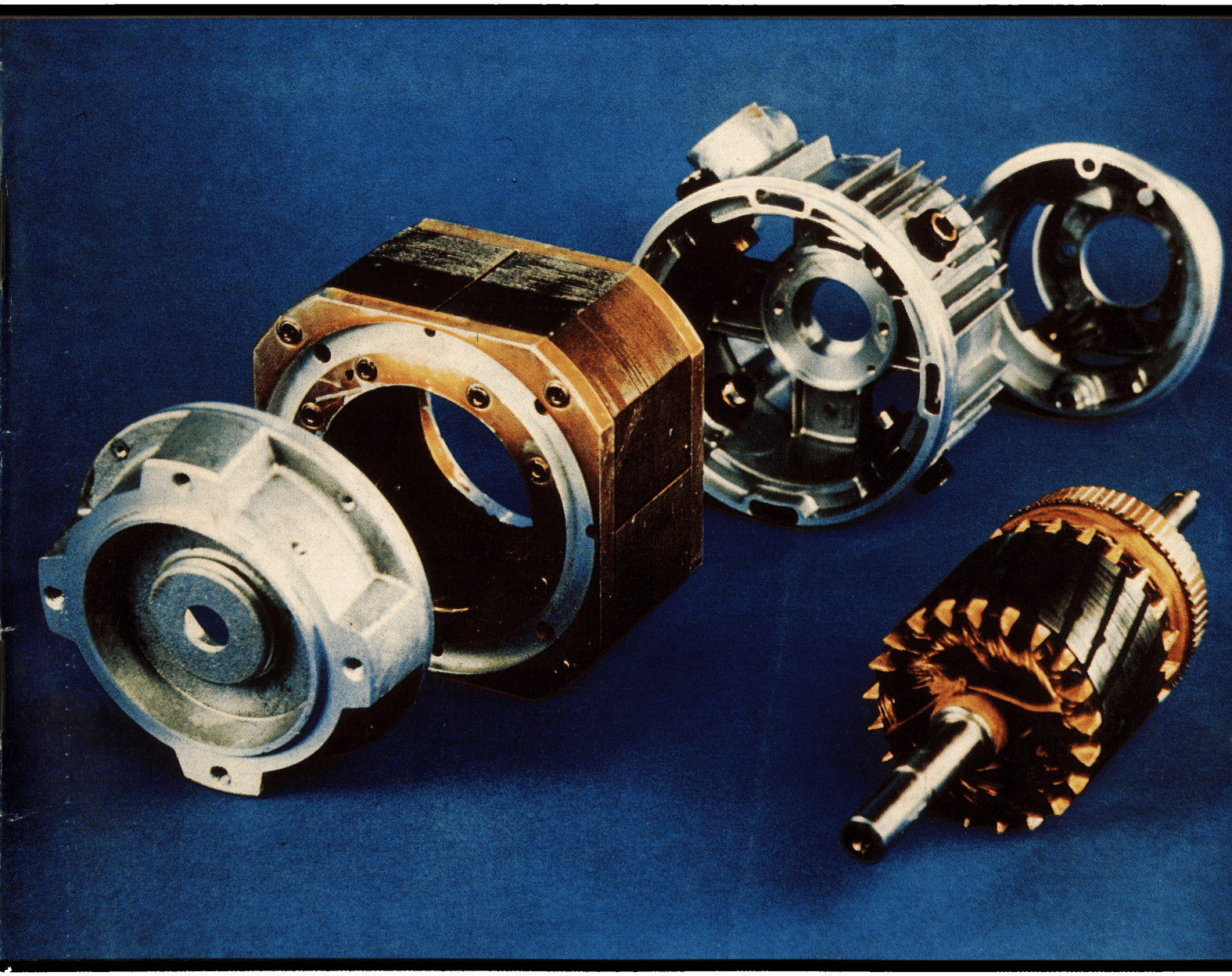
ELEKTRIE 6|88

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN · Postverlagsort für DDR Leipzig · EVP 2,50 Mark · ISSN 0013—5399



WMW NILES

CAD/CAM-Systeme
für elektrische Maschinen und Antriebe

0120248

Prof. Dr. sc. techn. Peter-Klaus Budig zum 60. Geburtstag

Am 15. Juli vollendet Prof. Dr. sc. techn. *Peter-Klaus Budig* sein 60. Lebensjahr. Ein Leben, das mit der Entwicklung der elektrischen Maschine und den elektrischen Antrieben verbunden ist und in dem er immer neue Verbindungen zwischen der Mikroelektronik und der elektrischen Antriebstechnik vorbereitet.

Ein Leben, das ihn geschult hat, mit Problemen fertig zu werden und Erfolge als Wurzel für höhere Zielstellungen anzusehen.

Nach dem Abitur und einem soliden Vorpraktikum wurde er 1948 an der Technischen Hochschule Dresden, Fakultät Elektrotechnik, immatrikuliert und schloß 1952 sein Studium mit dem Diplomprädikat „sehr gut" ab. Verdienstvolle Lehrer wie Prof. *Binder* und Prof. *Barkhausen* haben in ihm das Bedürfnis, in der Technik Neues zu schaffen, geweckt. Nach kurzer Assistentenzeit am Institut für Starkstromtechnik der TH Dresden zog es ihn in die Praxis. Seine wissenschaftliche Ungeduld verlangte danach, daß die von ihm entwickelten und berechneten Maschinen ein fertiges Produkt wurden. Er wurde 1954 im VEB Sachsenwerk Dresden Assistent des Chefkonstrukteurs, dann Haupttechnologe und schließlich Technischer Direktor. Sein ständig auf die Zukunft gerichteter Blick führte zur rechtzeitigen Entwicklung neuer Maschinentypen, sorgte durch Bereinigung des Profils und Neugestaltung der technologischen Prozesse für die Leistungsfähigkeit des Werkes. Komplizierte technische Probleme wie die Entwicklung neuer Hochspannungsisolationen wurden langfristig durch Grundlagenuntersuchungen vorbereitet. Neue Forderungen der Volkswirtschaft erweiterten das Sortiment und verlangten für Wasserkraftgeneratoren die Lösung komplizierter konstruktiver und technologischer Probleme. Mit der Entwicklung und dem Bau der Bahnmotoren unter seiner Leitung, wurde die Voraussetzung für die Herstellung elektrischer Lokomotiven in der DDR geschaffen.

Ein weiteres Problem bewegte ihn in der Mitte der 60er Jahre. Woher kommt der Nachwuchs für die schnell wachsende elektrotechnische Industrie der DDR? Dynamisch stellte er sich dieser Aufgabe und wurde 1966 als Honorarprofessor an die Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt berufen. 1968 wurde er ordentlicher Professor für elektrische Antriebstechnik und Antriebsmittel und wurde im gleichen Jahr Direktor der neu gebildeten Sektion Automatisierungstechnik.

Was er in diesen Jahren leistete, ist heute noch Maßstab und wird spaßhaft mit der Einheit „ein Budig" bezeichnet. Die Schaffung der Grundlagen für Linearmotoren bis zur Konstruktion, die mit dem Nationalpreis 2. Klasse geehrt wurde, die Gestaltung und der Aufbau der Sektion Automatisierungstechnik, die entscheidende Mitwirkung am Aufbau des für die Zukunft orientierten neuen Sektionsgebäudes mit Laborhalle, Leiter der Gruppe Elektrotechnik im Forschungsrat beim Ministerrat der DDR und Mitglied im Präsidium der KDT, ist noch keine vollständige Aufzählung. Gesellschaftlich war Prof. *Budig* Mitglied des Nationalrates der Nationalen Front bis 1982 und ist Mitglied des Zentralvorstandes der LDPD.

Bezeichnend für seinen vorausblickenden Arbeitsstil ist die Gestaltung der Sektion Automatisierungstechnik, die er bis 1984 leitete. In ihr sind die Gebiete Kybernetik, Regelungs- und Steuerungstechnik, Leistungselektronik, Antriebsmittel und Antriebstechnik schon frühzeitig vereint worden und somit wurde der Vorlauf für die mikroelektronische Antriebssteuerung geschaffen. Seit 1984 wirkt er als Dekan der Fakultät Elektrotechnik und widmet sich voll der neuen Studiengestaltung.

Viel Leistungen und Aktivitäten, zahlreiche Auszeichnungen, wie der Nationalpreis, der Vaterländische Verdienstorden in Silber, „Verdienter Techniker des Volkes", KDT- und Hochschulauszeichnungen, Korrespondierendes Mitglied der Akademie der Wissenschaften der DDR, zahlreiche von ihm herausgegebene Monographien und Bücher, Zeitschriftenartikel und auf Tagungen gehaltene Vorträge haben Prof. *Budig* zu einer national und international bekannten Persönlichkeit werden lassen. Seine Schüler sind heute als Diplomingenieure und Doktoringenieure, als Entwickler und Direktoren an vielen Stellen unserer Volkswirtschaft tätig und nehmen diesen Ehrentag zum Anlaß, ihren Dank für Wissens- und Erfahrungsvermittlung auszusprechen. Möge er noch lange der Wissenschaftler sein, von dem die Studenten sagen: „Was, der wird schon sechzig!"

H. Olbrisch, Karl-Marx-Stadt EA 2813

6|88 ELEKTRIE

42. Jahrgang

Wissenschaftlich-technische Zeitschrift der Elektrotechnik

ISSN 0013–5399

Organ des Fachverbands Elektrotechnik der Kammer der Technik

Die Zeitschrift erhielt die Goldene Ehrenplakette der KDT

Redaktionsbeirat

Vorsitzender:

Prof. Dr. sc. techn. J. Vogel

Mitglieder:

Prof. Dr. sc. techn. S. Altmann · Prof. Dr. sc. techn. H. Böhme · Prof. Dr. sc. techn. P.-K. Budig · Dr. sc. techn. G. Burkhard · Dr.-Ing. D. Flügge · Ober-Ing. K. Friedel · Prof. Dr. sc. techn. J. Hoffmann · Dipl.-Ing. H. Kabisch · Prof. Dr.-Ing. habil. R. Lappe · Dr. rer. nat. K. Möbius · Prof. Dr. sc. techn. E. Muschick · Prof. Dr. sc. techn. V. Pfeiler · Prof. Dr.-Ing. e. h. K. Pommer · Prof. Dr.-Ing. habil. R. Schönfeld · Obering. Dipl.-Ing. N. Wass · Prof. Dr.-Ing. habil. G. Wunsch

Korrespondenten:

Dr.-Ing. K. Hannella, Ilmenau · Dr.-Ing. W. Jordan, Dresden

Titelbild

Mit der Automatisierung von Fertigungsstätten ist die Analyse einzelner Prozeßabläufe verbunden, die unter anderem für die eigentliche CAD/CAM-Arbeit einen Dialog mit dem Antriebssystem über digitale, serielle Bussysteme erfordert.
Unser Bild zeigt als Beispiel einen in seine Hauptbaugruppen zerlegten Gleichstrom-Stellmotor der Reihe RSM aus dem VEB NILES-Stellantriebe Dresden (s. Beitrag auf den Seiten 205 bis 207 in diesem Heft).

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

Träger des Ordens Banner der Arbeit

Inhalt

Seite

Aktuelle Information 202

Zimdars, J.
Möglichkeiten der Nutzung von Büro- und Personalcomputern für die Patentinformationsarbeit in Kombinaten und Forschungseinrichtungen 203

Prof. Dr. sc. techn. Peter-Klaus Budig zum 60. Geburtstag 2.US

Fachaufsätze

Birke, K.; Walther, H.; Roschitzki, W.
CAD/CAM-Systeme für elektrische Maschinen und Antriebe 205

Timmel, H.; Jugel, U.
Mikrorechnergesteuerter, linearer Positionierantrieb mit Elementarschrittweiten unter 10 µm 208

Beckert, U.
Theorie des dynamischen Verhaltens von Drehstromasynchronmotoren mit Stromverdrängungsläufer 213

Porzel, R.; Linsel, K.-H.
Isolationsprüfgerät für Hochspannungswicklungen elektrischer Maschinen 217

König, H.
Ermittlung der Parameter der Drehstromasynchronmaschine vorwiegend aus den Typenschildangaben 220

Diedrichs, V.
Zur Identifikation der Modellparameter elektrischer Maschinen mit stochastischer Optimierung. Teil 2 221

Krause, M.
Beanspruchung von Synchronmaschinen im Asynchronbetrieb. Teil 1 224

Oesingmann, D.; Morgenfrüh, B.
Einfluß der Bürstenqualität auf das Betriebsverhalten von batteriegespeisten Gleichstrommaschinen 228

Veselka, F.
Methode „Kurzschluß des Ankerkreises" und neue Vergleichskriterien, angewendet bei der Untersuchung des Kommutierungsverhaltens 230

Kalinchik, W. P.; Backmann, Chr.
Zu Fragen der operativen Prognose der Elektroenergieabnahme von Industrieobjekten 232

Umschau

Fachtagungen 235

Dissertationen 236

Patente 237

Buchbesprechungen 238

AKTUELLE INFORMATION

Messen und Prüfen in der chemischen Industrie

Internationales Messesymposium

Zeit: 8. und 9. September 1988
Ort: Leipzig

Veranstalter: Wissenschaftlich-Technische Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik (WGMA)

Inhaltliche Schwerpunkte

— Prozeßautomatisierung
— Sensoren und Sensorsysteme für Meßgrößen in der chemischen Industrie
— Chromatografie
— Flüssigkeits- und Gasanalyse
— pH-Wert-Messung
— Spektralanalyse

Anfragen

sind schriftlich zu richten an
Kammer der Technik
Präsidium — WGMA
PSF 1315, Berlin, 1086

K.-D.-Müller, Berlin EA 2834

Elektronische Steuerungen auf Mikrorechnerbasis

XV. Fachtagung des Fachausschusses 14

Zeit: 25. Oktober 1988
Ort: Berlin

Veranstalter: Fachverband Elektrotechnik in der Kammer der Technik; Fachausschuß 14 „Steuerungs- und Regelungstechnik"

Inhaltliche Schwerpunkte

— Einführung von Expertensystemmodi in die Projektierung moderner Steuerungssysteme
— Die 16-Bit-Industriecomputerfamilie ICA 700
— Anwendung modularer Grundbaugruppen MGB 7000 S 2000; ICA 700 und P 8000
— Weiterentwicklung des Mikrorechnersteuersystems audatec

Anfragen

Teilnahmemeldungen sind schriftlich zu richten an
Kammer der Technik
Präsidium — Fachverband Elektrotechnik
FSF 1315, Berlin, 1086

H. Hoppe, Berlin EA 2818

Grundlagen der Modellierung und Simulationstechnik

17. Jahrestagung

Zeit: 7. bis 9. Dezember 1988
Ort: Rostock

Veranstalter: Wissenschaftlich-Technische Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik (WGMA)

Inhaltliche Schwerpunkte

— Simulationsmethoden und -techniken
— Mathematische Modellierung von Umweltproblemen
— Mathematische Modellierung und Schaltkreisentwurf
— Simulation auf 16-Bit-Mikrorechnern
— Mathematisch-theoretische Grundlagen
— Experimentell-technische Erfahrungen
— Praktische Beispiele

Anfragen

sind schriftlich zu richten an
Kammer der Technik
Präsidium — WGMA
PSF 1315, Berlin, 1086

K.-D. Müller, Berlin EA 2835

Hochspannungsschaltgeräte

10. KDT-Fachkolloquium Elektroenergieversorgung

Zeit: 9. und 10. November 1988
Ort: Zittau

Veranstalter: KDT-Fachsektion Elektroenergieversorgung der TH Zittau gemeinschaftlich mit dem FV-Elektrotechnik (WSEE, FUA 13.3 Hochspannungsschaltgeräte und -anlagen)

Inhaltliche Schwerpunkte

Zielstellung des Kolloquiums ist es, einen größeren Kreis von Fachkollegen über die Ergebnisse von Wissenschaft, Produktion und Betriebsführung dieser Geräte zu informieren. Im Mittelpunkt stehen dabei:

— Neue Schaltprinzipien
— Zuverlässigkeit
— Diagnose
— Instandhaltung

Anfragen

Technische Hochschule Zittau
KDT-Fachsektion E, Tel.: 61314 oder 61315
und Anmeldungen (Termin 15. 10. 1988)
Technische Hochschule Zittau
KDT-Fachsektion E
Theodor-Körner-Allee 16
PSF 261, Zittau, 8800

P. Reinhold, Zittau EA 2838

Automatisierungstechnik

Jahrestagung der WGMA

Zeit: 15. und 16. Dezember 1988
Ort: Magdeburg

Veranstalter: Wissenschaftlich-Technische Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik (WGMA)

Inhaltliche Schwerpunkte

— Stand und Tendenzen der Organisationsprojektierung
— Stand und Tendenzen der Büroautomatisierung
— Stand und Tendenzen automatisierter Systeme der Leitung
— Softwaretechnologie, -sicherheit und -zuverlässigkeit

Anfragen

sind schriftlich zu richten an
Kammer der Technik
Präsidium — WGMA
PSF 1315, Berlin, 1086

K. D. Müller, Berlin EA 2836

Computer- und Mikroprozessortechnik '88

Fachtagung mit internationaler Beteiligung aus den RGW-Ländern

Zeit: 15. und 16. Dezember 1988
Ort: Berlin

Veranstalter: Fachverband Elektrotechnik in der Kammer der Technik; Wissenschaftliche Sektion Computer- und Mikroprozessortechnik

Inhaltliche Schwerpunkte

— Mikroprozessorsysteme/Kundenschaltkreise
— Entwurfs- und Testsysteme
— Expertensysteme
— Personalcomputer (16 Bit), Mikrorechnersystem (32 Bit)
— Mikroprozeßrechner-/Steuerungssysteme
— Betriebssysteme
— Fachsprachen

Anfragen

sind schriftlich zu richten an
Kammer der Technik
Präsidium — Fachverband Elektrotechnik
PSF 1315, Berlin 1086

H. Hoppe, Berlin EA 2800

Lichttechnik

2. Internationale Fachtagung

Zeit: 27. bis 29. September 1989
Ort: Berlin

Veranstalter: FV Elektrotechnik; WS Lichttechnik; K VEB NARVA Berlin

Orientierung eines breiten Kreises von Wissenschaftlern und Technikern der optischen Strahlung erzeugenden und anwendenden Industrie über die Aufgaben der optischen Strahlungs-, Licht- und Beleuchtungstechnik bei der weiteren Entwicklung von Schlüsseltechnologien und der Durchsetzung der Energiepolitik der Partei und Regierung.

Inhaltliche Schwerpunkte

— Einsatz der Mikroelektronik und Rechentechnik bei der Erzeugnisentwicklung von optischen Strahlungsquellen und Leuchten und in der Beleuchtungstechnik, insbesondere bei Projektierungsaufgaben (CAD/CAM)
— Einsatz der optischen Strahlungstechnik für Schlüsseltechnologien (Mikroelektronik, Biotechnologie, Medizin u.a.)
— Stand der Erfüllung des Staatsauftrages zur Energieeinsparung im Fünfjahrplanzeitraum 1986 bis 1990

Anfragen

und Teilnahmemeldungen sind schriftlich an den FV Elektrotechnik zu richten:

Kammer der Technik
Präsidium
FV Elektrotechnik
Postfach 1315
Berlin
1086

H. Hoppe, Berlin EA 2613

Möglichkeiten der Nutzung von Büro- und Personalcomputern für die Patentinformationsarbeit in Kombinaten und Forschungseinrichtungen

Von

Jürgen Zimdars

Leiter der Abteilung Information und Recherche
Amt für Erfindungs- und Patentwesen der DDR

Die an die Kader in Forschung und Entwicklung gestellten Anforderungen — Vorstoß in wissenschaftliches Neuland und das Hervorbringen von technischen und technologischen Lösungen, die deutlich über in der Welt bereits Bekanntes hinausgehen — erfordern, alle Ressourcen für die weitere Qualifizierung der geistig-schöpferischen Arbeit konsequent zu nutzen.

Mit dem umfassenden Angebot des Amtes für Erfindungs- und Patentwesen (AfEP) an statistischen, bibliographischen, Referate- und Volltextinformationen zu den Erfindungsbeschreibungen der wichtigsten Industriestaaten ist in der DDR ein großer Wissensschatz vorhanden. Er ist als Leistungsreserve für Wissenschaft und Technik aber bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Zahlreiche Wissenschaftler und Ingenieure beziehen das in der Patentliteratur dokumentierte anwendungsbereite Wissen der Menschheit auf dem Gebiet von Wissenschaft und Technik als notwendiges Rüstzeug für die Bewältigung von Forschungsaufgaben mit hohen Niveauansprüchen in ihre Arbeit noch nicht oder nur sporadisch ein. Diese Kader erkennen die Bedeutung der Patentliteratur für die Analyse der Schutzrechtssituation oder die Bewertung der Rechtsmängelfreiheit an, ignorieren dabei aber, daß die Patentfonds die umfassendste Sammlung technischer Ideen sind.

Um ein einheitliches und anforderungsgerechtes Handeln der Kader in Forschung und Entwicklung zu sichern, muß die systematische Auswertung der Patentliteratur und die Umsetzung des Wissens aus Patenten in anspruchsvolle Forschungsaufgaben durch vom Generaldirektor bestätigte verbindliche Festlegungen geregelt werden. Ein weiterer Aspekt ist, die Kader, die noch abseits stehen, mit wirksamen Beispielen zu überzeugen, ihnen also die Vorzüge der Patentinformation, die Methodik ihrer Erschließung und die damit erzielten Wirkungen konkret vorzustellen. In den Kombinaten, in denen die Patentinformationsarbeit zum festen Bestandteil der Forschungstechnologie geworden ist und ihre Ergebnisse abrechnungspflichtig sind, werden die größten Wirkungen erzielt.

In der Regel werden als Begründung für eine unzureichende Nutzung des Wissens aus Patenten genannt: der erforderliche Zeitaufwand, weite Wege, fehlende Kader und unvollständige Fonds in den Kombinaten und Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen. Ein weiteres Argument sind die sich ständig vergrößernden Informationsmengen.

Der Welt-Patentfonds umfaßt gegenwärtig etwa 35 Millionen Patentdokumente, jährlich kommen mehr als eine Million dazu.

Mit der Nutzung der neuen Informations- und Kommunikationstechnologien bestehen gute Chancen, um schrittweise diese Bedingungen entscheidend zu verbessern. Die rechnergestützte Patentinformationsarbeit ist ein erfolgreicher Weg, um das heute noch zu verzeichnende Informationsdefizit zahlreicher Forschungskader in Kombinaten und Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen abzubauen. Die Nutzung der in den Kombinaten vorhandenen Rechentechnik für die Qualifizierung und Rationalisierung der Informationsprozesse ermöglicht den Kadern in Forschung und Entwicklung, in der Nähe des Arbeitsplatzes alle für die Bewertung des Weltstandes und der Tendenzen seiner Entwicklung benötigten wissenschaftlich-technischen und Patentinformationen rationell an einem Bildschirmarbeitsplatz zu erschließen.

Bei der rechnergestützten Patentinformationsarbeit wird vom Grundsatz der einmaligen Erfassung und vielfältigen Nutzung ausgegangen. Alle für die Patentinformationsarbeit benötigten bibliographischen und Referate-Informationen werden in den Patentdatenbanken des AfEP zentral erfaßt, gespeichert und aufbereitet.

Schrittweise erhalten die Kombinate und Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen die Möglichkeit, diese in Patentdatenbanken gespeicherten Patentinformationen im Fernzugriff zu nutzen. Die Ergebnisse der im Fernzugriff durchgeführten Recherchen an Bildschirmarbeitsplätzen in Kombinaten und Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen können auf Diskette gespeichert und als Grundlage für den Aufbau eigener rechnergestützter Patentfonds in den Kombinaten und Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen genutzt werden. Dabei ist zu entscheiden, ob separate rechnergestützte Patentfonds aufgebaut werden oder ob die Patentinformationen in Datenbanken der wissenschaftlich-technischen Information

einbezogen werden bzw. ob der rechnergestützte Patentfonds auf der Grundlage von Bürorechnern oder von Großrechnern aufgebaut wird. Denkbar wäre auch eine Verknüpfung dieser beiden technischen Varianten, wie das z.B. im VEB Carl Zeiss JENA heute schon bei der Verarbeitung der Welt-Patent-Dienst-Informationen erfolgt. Dabei wird ein Magnetband für das Gesamtprofil des Kombinates vom AfEP übernommen. Den einzelnen Forschungs- und Entwicklungskollektiven werden dann die relevanten Patentinformationen auf Diskette bereitgestellt.
Aufgabe der Kombinate ist es, die erforderliche Hard- und Software eigenständig zu beschaffen.
Der Fernzugriff zu den Patentdatenbanken des AfEP erfordert:

1. HDN-Anschluß der Deutschen Post (Antrag an Bezirksdirektion der Deutschen Post),
2. Terminal (PC 1715, BC 5120/30),
3. Modem (AM/VM 2400, TAM 601),
4. Telekommunikationssoftware (EM PC/BC).

Als Telekommunikationssoftware ist der EC-7925-Emulator (EM PC/BC) notwendig. Der Emulator realisiert die Übertragungsprozedur BSC 3 zur synchronen zeichenweisen Datenfernübertragung über die Schnittstelle V.24 des PC 1715 oder BC 5120/30 als fernangeschlossenes Terminal. Mit diesem Programm wird der Datenaustausch zwischen BC/PC und einer ESER-EDVA mit dem Betriebssystem SCP unterstützt.
Wenn diese Voraussetzungen erfüllt sind, ist als nächster Schritt der Abschluß einer Vereinbarung mit dem AfEP erforderlich.

Der Fernzugriff bzw. die Dialogsitzung vom Bildschirmarbeitsplatz im Kombinat in der Patentdatenbank vollzieht sich dann unter Beachtung der Anforderungen von Ordnung und Sicherheit in folgenden Schritten:

1. Herstellung der telefonischen Verbindung mit dem VEB DVZ Frankfurt (Oder) über HDN,
2. Aufbau der Verbindung zur jeweiligen Datenbank über die Vermittlungstechnik im VEB DVZ Frankfurt (Oder),
3. Einstieg in die Datenbank mit einer vergebenen Nutzerkennung (Paßwort),
4. Durchführung und ordnungsgemäße Beendigung der Dialogrecherchesitzung in der jeweiligen Patentdatenbank entsprechend der Anwenderdokumentation für DIALOG-2,
5. Auflösung der Verbindung gemäß 2 und 1.

Im Rahmen des Experimentalbetriebes erfolgt der Fernzugriff zu den Datenbanken kostenlos, der Nutzer muß nur die Nutzung der HDN-Leitung bezahlen. Im Routinebetrieb entstehen dann dem Nutzer zusätzlich noch datenbankspezifische Kosten.
Kombinate und Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen können 1988 beginnend mit Büro- und Personalcomputern über das Datennetz der DDR im Fernzugriff die Patentdatenbanken des AfEP nutzen. 1988 wird dafür die Datenbank DDR-Patentdokumente bereitgestellt. Sie enthält bibliographische Daten, Deskriptoren und Referateinformationen zu den Patentdokumenten der DDR ab 1983.
Schrittweise werden vom AfEP weitere bibliographische und thematische Patentdatenbanken für den Fernzugriff bereitgestellt. Damit können sich die Nutzer an Bildschirmarbeitsplätzen in den Kombinaten im Dialog mit den Patentdatenbanken über den Stand der Technik, über die Tendenzen seiner Entwicklung, über die Patentaktivitäten von Firmen, Konzernen und ausgewählten Spezialisten sowie über den Freiraum für eigene schutzfähige technische oder technologische Lösungen informieren.

Diese Arbeitsweise konsequent angewendet, bringt für die in Forschung und Entwicklung tätigen Kader und die Büros für Schutzrechte folgende Effekte:

— schneller Zugriff zu Informationen aus Patenten für die Bewertung des Weltstandes und die Tendenzen seiner Entwicklung
— deutliche Reduzierung der Recherchezeit von Tagen auf Stunden bei gleichzeitiger Erhöhung des Umfangs der auswertbaren Fonds
— wirksame Erhöhung der Qualität der Recherchen durch Auswertung der Patentdokumente nach allen Inhaltskomponenten und bibliographischen Daten sowie deren Verknüpfungen
— rationelle Überwachung der Veränderungen des Standes der Technik und der Patentaktivitäten von Firmen, Konzernen und Spezialisten
— kontinuierliche Information über die zunehmende Verflechtung der Gebiete von Wissenschaft und Technik
— komplexe Auswertung von Patentinformationen und anderen wissenschaftlich-technischen Informationen an einem Bildschirmarbeitsplatz
— umfassende kontrollfähige Einbeziehung der Patentinformation in die Forschungstechnologie
— schrittweise Überwindung von Standortnachteilen.

Dabei kann im Ergebnis einer Dialogrecherche in den Patentdatenbanken entschieden werden, ob das Rechercheergebnis am Bildschirm ausgewertet wird, ob ein Ausdruck erfolgen soll oder ob das Ergebnis auf Diskette gespeichert wird.
Im VEB Kombinat Polygraph „Werner Lamberz", im VEB Flachglaskombinat Torgau und im VEB Chemiefaserwerk Guben liegen erste Erfahrungen bei der Weiterverarbeitung der auf Diskette gespeicherten Patentinformationen vor.
In diesen Kombinaten werden bereits heute die aus der Patentdatenbank „Neuveröffentlichte Erfindungsbeschreibungen des Welt-Patentfonds" gewonnenen Patentdaten mit dem Programm Dial-Off detailliert ausgewertet und für den Aufbau eigener bibliographischer Patentspeicher genutzt. Dieses Programm ermöglicht:

— Menüunterstützte Recherchen nach Ordnungseinheiten der Int. Cl., Anmeldern/Inhabern und Patentnummern im Schnelldurchlauf bzw. in ausführlicher Einzeldarstellung
— Recherchen in REDABAS-Dateien außerhalb des Menüs
— Bildschirmausgabe bzw. Drucklisten im Standardformat oder nach individueller Feldauswahl.

Die Erfahrungen dieser Kombinate beweisen, daß durch die Weiterverarbeitung der im Fernzugriff erzielten Rechercheergebnisse am PC die Überwachung des internationalen Patentgeschehens rationeller und wirksamer realisiert werden kann.
Dazu gehören:

— umfassender Überblick über die in der Welt neuveröffentlichten Erfindungsschutzrechte auf dem Fachgebiet
— sofortige bibliographische Information über Veränderungen des Standes der Technik in der Welt
— systematische Überwachung der schutzrechtlichen Aktivitäten von Konkurrenten und Mitbewerbern
— schnelle Information über den territorialen Schutzumfang von Erfindungsschutzrechten und seine Entwicklung
— ständiger Überblick zu Veränderungen des Rechtsbestandes ausgewählter Erfindungsschutzrechte.

Bei der Organisierung des Fernzugriffs zu den Patentdatenbanken gibt das AfEP jede mögliche Unterstützung. 1987 wurden bereits 36 Kombinate und Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen über die konkreten hard- und softwareseitigen Bedingungen für ihren Fernzugriff informiert und ausgewählten Kadern wurde die Möglichkeit gegeben, an einem Bildschirmarbeitsplatz im Amt erste Erfahrungen beim Zugriff zur Datenbank „DDR-Patentdokumente" zu sammeln. Im Vorfeld der Testung des Fernzugriffs wird den Nutzern eine Anwenderdokumentation übergeben, die alle für den Fernzugriff wichtigen Informationen umfaßt. Die Qualifizierung der Nutzer für den Fernzugriff zu den Patentdatenbanken müssen die Kombinate und Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen in eigener Verantwortung realisieren.
Ein erster Bildschirmarbeitsplatz mit Fernzugriffsmöglichkeiten zur Datenbank „DDR-Patentdokumente" des AfEP und zur Datenbank „Wissenschaftlich-technischer Fortschritt" des ZIID wurde im Kombinat EAW eingerichtet. Die dort gemachten Erfahrungen werden zügig verallgemeinert und in die Zusammenarbeit mit den Kombinaten und Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen einbezogen.
Eine mit schöpferischem Elan vorangetriebene Nutzung von Büro- und Personalcomputern ermöglicht, Effektivität und Qualität der Patentinformationsarbeit spürbar zu erhöhen, einen wesentlich größeren Mitarbeiterkreis in die komplexe Nutzung des Wissens aus Patenten und anderer wissenschaftlich-technischer Informationsquellen einzubeziehen und damit einen noch wirksameren Beitrag der Patentinformation und der wissenschaftlich-technischen Information für ein hohes Niveau der Arbeit in Forschung und Entwicklung zu sichern.

EA 2806

CAD/CAM-Systeme für elektrische Maschinen und Antriebe

K. Birke; H. Walther; W. Roschitzki; KDT, Dresden

Mitteilung aus dem VEB NILES Stellantriebe Dresden

Herrn Prof. Dr. sc. techn. *Peter-Klaus Budig* zum 60. Geburtstag gewidmet

CAD/CAM Systeme, ihr Aufbau und Einsatz stellen eine große Herausforderung an eine komplexe Zusammenarbeit von Industrie und Wissenschaftseinrichtungen dar. Im Ergebnis ist eine Verschiebung und Vernetzung der Aufgabenbereiche feststellbar. Die Integration einzelner Insellösungen zu Gesamtsystemen ist der erforderliche Schritt zur umfassenden Automatisierung von Fertigungsstätten. Sie ist ohne Automatisierung von Arbeitsabläufen genausowenig denkbar wie die Forderung nach erhöhter Qualität und Produktionsgeschwindigkeit. Da in die Prozeßabläufe auch einzelne Betriebssysteme mit einbezogen sind, ist die Dialogfähigkeit von Antriebssystemen, bestehend aus Stromrichtergeräten und Stromrichteranlagen und Gleichstrom- bzw. Drehstrommaschinen über digitale, serielle Bussysteme erforderlich. Mit Hilfe der Mikroelektronik schaffen neue technische Lösungen dieser Antriebe optimale Voraussetzungen zur Betriebsführung und -überwachung automatisierter Fertigungsprozesse.

Aus der Analyse einer solchen Vernetzung leiten sich die eigentlichen Aufgaben für CAD/CAM-Systeme ab. Zur Problematik eines Antriebes, bestehend aus Steller, Motor und Geber, sei unter diesem Aspekt festgestellt, daß das Elektronikpaket nach [1] Bild 1 in seiner Struktur von der Ankopplung an übergeordnete Systeme wie CNC/SPS-Steuerungen oder IR-Steuerungen und Anlagen mit Transfercharakter stark geprägt ist.

Die Motorseite eines solchen Antriebes nach Bild 2 enthält hinsichtlich der Fertigung die CAD/CAM-Problematik von Erzeugnissen des Maschinenbaus. Die Verbindung zwischen den funktionalen und geometrischen Daten dieser Teile erfordert eine Verbindung zwischen Entwurfsdaten, z. B. eines elektromagnetischen Kreises mit direktgekoppelten Daten der Dateien einer Fertigungsstätte. Diese Verbindung kann die Anwendung finiter Elemente sein, die einen iterativen Designprozeß, in dem sich Feldanalyse und Systemkorrektur (Optimierung) so lange wiederholen, bis die gestellten Anforderungen erfüllt werden. Ein solcher Prozeß ist denkbar, erfordert aber Rechnersysteme mit einer sehr hohen Rechengeschwindigkeit und Verarbeitungsbreite.

Dipl.-Ing. *Klaus Birke* ist Betriebsdirektor, Dipl.-Ing. *Hansjörg Walther* ist Leiter der Abt. Entwicklung und Konstruktion, Dipl.-Ing. *Werner Roschitzki* ist Mitarbeiter der Abt. Entwicklung und Konstruktion im VEB NILES-Stellantriebe Dresden.

1. CAD/CAM-Systeme für elektrische Maschinen

Beim Einsatz von solchen Systemen sollte von einem gewissen Modulcharakter ausgegangen werden. In der Anwendung entsteht eine Verkürzung von Entwicklungszeiten nur, wenn durchgängige Systeme aufgebaut werden. Insellösungen erleichtern zwar einzelne Arbeitsgänge, erfüllen aber nicht die hohen Erwartungen verbunden mit hohen Investitionen, Durchgängigkeit im Sinne Entwurf — Fertigung.

Folgende Arbeitsschritte sind für die rechnergestützte Erzeugnisentwicklung erforderlich [2]:

1. Analyse verfügbarer Berechnungsprogramme, die bereits Verwendung finden und Zusammenstellung relevanter physikalisch-technischer Eigenschaften, die im Hinblick auf eine Erhöhung der Erzeugnisqualität stärker berücksichtigt werden müssen.
2. Ableitung von Forderungen an Modelle, die mit Simulationsmethoden behandelbar sind. Darauf aufbauend
   — Forderungen an Modelle
   — Forderungen an Softwaresysteme.
3. Anwendung eines Modellierers, z. B. 3-D-Geometriemodellierer GEKO unter dem Aspekt der Ableitung von Daten zur Weiterverarbeitung
4. Untersuchung von Modellbildungszusammenhängen
   — meßtechnische Bestimmung des Objektverhaltens
   — Parameteridentifikation
   — aus geometrisch-stofflichen Modellen sich ergebende Zuordnung zu Modellelementen.
5. Zentralisierte Datenverwaltung für funktionelle und geometrisch-stoffliche Parameter und Strukturen.

Schon die Anwendung nur auf eine Teileklasse, z. B. auf rotationssymmetrische Teile, zeigt, wie kompliziert die Schaffung von Modulen für durchgängige Lösungen aufgrund verfügbarer Rechentechnik ist. In einem CAD-Teil, Programm REBUS II [3], können rotationssymetrische Einzelteile mit fast 80 % aller bei elektrischen Maschinen vorkommenden Geometrien über Dialog durch Eingabe von Konstruktionselementen aus einem manuell erstellten Entwurf erzeugt werden. Die Datenspeicherung des erzeugten Teiles erfolgt in der rechnerinternen Darstellung (RID) und kann im Einzelteilspeicher (ETS) abgelegt und wieder aufgerufen werden. Aus der

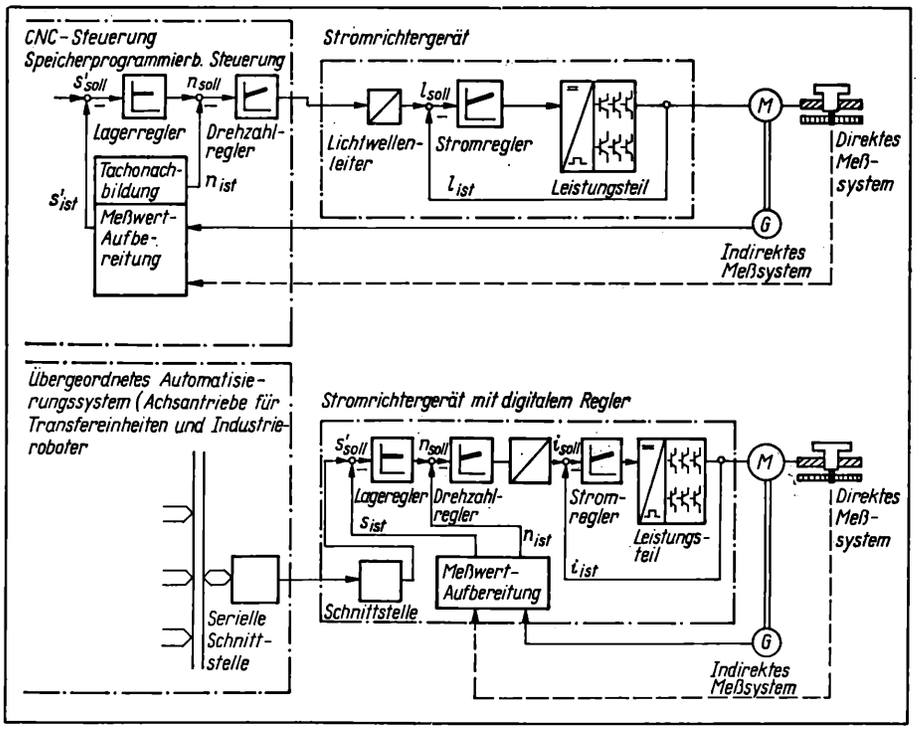


Bild 1. Antriebsstrukturen in Automatisierungssystemen

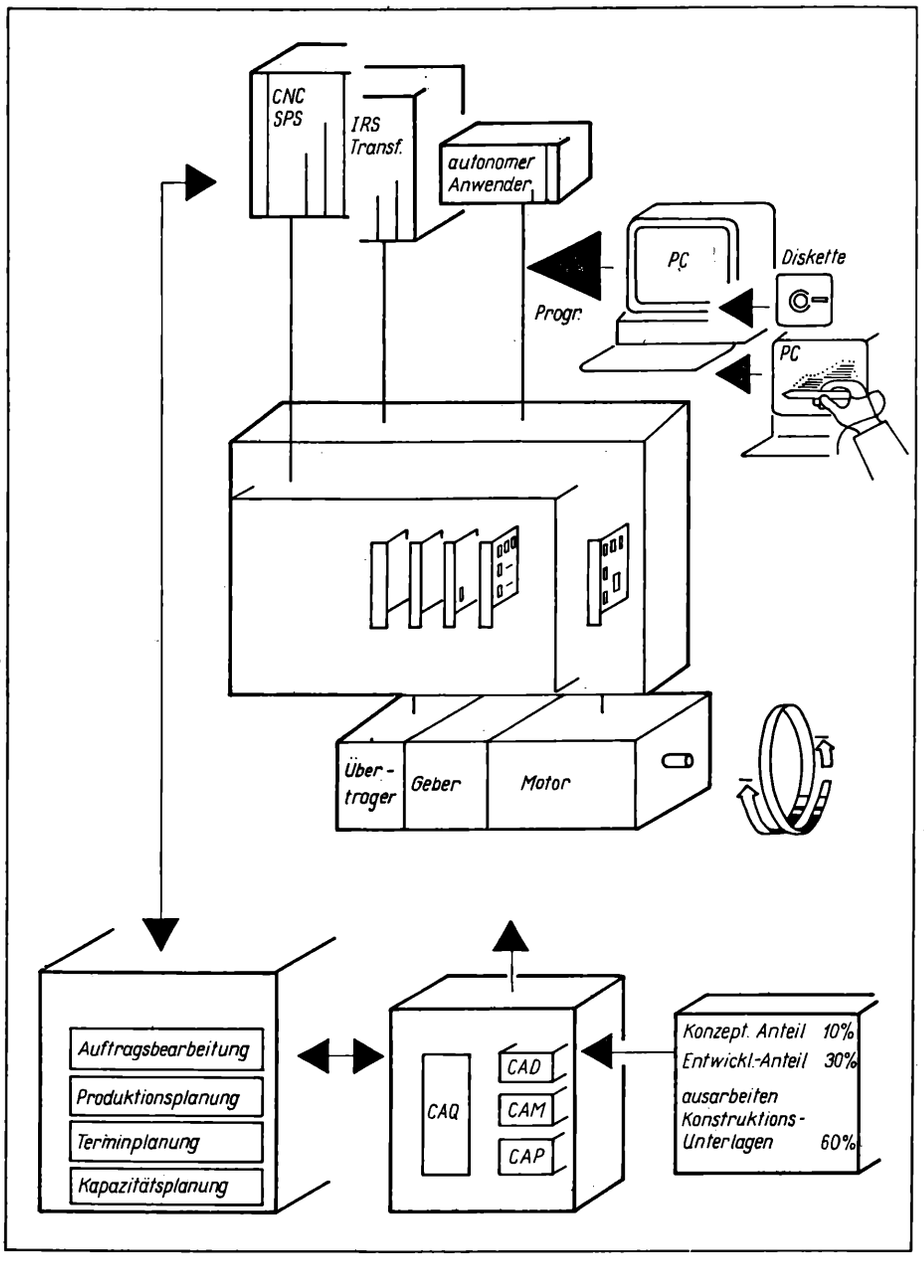


Bild 2. Vernetzung Konstruktionsprozeß mit Automatisierungsniveau

RID kann on-line oder off-line über Platte eine fertigungsgerechte Zeichnung ohne weitere Eingabe von Daten erzeugt werden. Schnittstelle für den CAM-Teil, Programmname AUTOTECHPRO [3], ist die RID aus dem CAD-Teil. Im CAM-Teil können bei der exakten Beschreibung der technologischen Fertigungsbedingungen in Dateien die Fertigungsunterlagen bis zum CNC-Steuerlochstreifen erzeugt werden. In das Programmpaket CAD sind noch keine technischen Auslegungsberechnungen eingebunden.

Baugruppen sind nicht bearbeitbar. Für einen Akt 6454 wird dabei die gesamte Rechnerkapazität benötigt. Neben der Systemplatte sind für jeden Teil 3 Kassettenplattenspeicher erforderlich.

Ein wesentlicher Vorteil entsteht bei einer Strategie zu einem Software-Basissystem, mehrere Software-Spezialmodule einzuordnen [4]. Für reine CAD-Arbeiten wird ein Basissystem gewählt, das Arbeiten auf der 2D- und 3D-Ebene (Draht- und Flächenmodelle) mit der gleichen Datenbasis ermöglicht. Für volumenorientierte Aufgaben wird ein spezieller CAD-Modul zur Verfügung gestellt, der über eine Schnittstelle Drahtmodelle in beiden Richtungen austauschen kann. Um die NC-gesteuerte Bearbeitung von Gußbauteilen zu unterstützen, wird ein Modul für Freiformflächen und NC-Vorbereitung eingesetzt. Eine besondere Erleichterung bei der Vernetzung von Flächen und Körpern ist durch 2 Finite-Elemente — Netzgeneratoren gegeben.

Die bisherigen Erfahrungen mit CAD-Systemen zeigen [5], daß sich nur mit integrierten Abläufen wirtschaftliche Vorteile in Form von Qualitätssteigerungen, Verkürzung der Entwicklungszeiten erzielen lassen. Der Anteil der 3D-flächen- und volumenbeschriebener Bauteile steigt. Der Einsatz von Freiformflächen bei der Objektbeschreibung ermöglicht dem Konstrukteur erstmals, diese Flächen vollständig und eindeutig in Verbindung mit den Fertigungsprozessen zu beschreiben. Allgemein entsteht eine Verschiebung des Anforderungsprofils für die zukünftigen Konstrukteure und Teilkonstrukteure, die neben hoher erzeugnisbezogener Qualifikation mit komplizierten CAD-Systemen umgehen müssen. So werden qualifikatorische Anforderungen an das Denk- und Abstraktionsvermögen sowie geistige Flexibilität in einer neuen Qualität definiert.

Anforderungen an Kenntnisse der Handhabung und Bedienung EDV-technischer Geräte werden zum Mittelpunkt der Tätigkeit, die eine hohe individuelle Modifikation und Bereitschaft, sich den veränderten Arbeitsweisen und den damit verbundenen Arbeitsbedingungen, wie beispielsweise der Schichtarbeit, anzupassen verlangt.

2. CAD, CAC, CAP, CAS, CAQ, CAE — CIM

Die Durchdringung des gesamten Reproduktionsprozesses eines Betriebes mit Automatisierungsinseln und ihre Anbindung an ein technisches Kommunikationssystem wird heute unter dem Begriff CIM-Strategie des Betriebes der Zukunft zusammengefaßt. Das bedeutet die Vernetzung von

— Auftragswesen
— Konstruktion
— NC-Programmierung

— Fertigungsvorbereitung
— Werkzeugmaschinensteuerung
— Materialfluß
— Qualitätssicherung
— Lagerhaltung.

Analysiert man einen Fertigungsprozeß auf die notwendigen Zeitgrößen für die Durchführung der einzelnen Abschnitte, so zeigt sich folgende Verteilung

reine Bearbeitungszeit	10 %
Prozeßliegezeit der Teile	30 %
Steuerzeit im Prozeß	60 %.

Der Nutzen von CIM-Lösungen liegt aufgrund der Verteilung auch in anzustrebenden Rationalisierungseffekten, der schnelleren und verbesserten Auftragsabwicklung zum Erreichen kürzerer Reaktionszeiten bei Kundenaufträgen.

3. Beispiel eines Betriebes für Automatisierungs-Teillösungen

Genannt sei hier eine Fertigungsstätte für roboter- und werkzeugmaschinenspezifische Stellmotoren [5]. Produziert werden mehrere Grundtypen von Gleichstrom-Stellmotoren in vielen Varianten und die dazugehörigen Gleichstrom-Tachogeneratoren.
Der Fertigungsprozeß ist durch ein stark differenziertes Automatisierungsniveau in den verschiedenen Fertigungsbereichen gekennzeichnet:

— flexibles Fertigungssystem mit 16 CNC-gesteuerten Werkzeugmaschinen, die vollständig über ein automatisiertes Transportsystem, Umschlag- und Lagersystem mit Werkstücken und Abprodukten ver- und entsorgt werden sowie mit Informationen über Lichtwellenleiter mit dem DNC-Steuerrechner direkt verkoppelt sind
— automatisierte Einzelarbeitsplätze, wie in der Stanzerei, der Wickelei, am Kommutatorschlitzautomaten und am rechnergestützten Prüfstand als Insellösungen
— reine Handarbeitsplätze in der Montage und in Bereichen der Vorfertigung.

Im Organisationsprozeß sowie in den Bereichen Qualitätssicherung, Materialwirtschaft, Ökonomie, Absatz und Grundfondswirtschaft sind einzelne Lösungen auf ESER bzw. Bürocomputer vorhanden, die jedoch ausschließlich als Insellösungen angelegt sind und keine durchgängige Bearbeitung von Teilprozessen ermöglichen.
Durch diese starke Differenziertheit entstehen in der Zusammenarbeit mit der übergeordneten Produktionsprozeßsteuerung Verluste durch:

— fehlende Durchgängigkeit des Prozesses
— Informationsverluste durch fehlende Koppelschnittstellen
— Informationsverfälschungen durch subjektive und Eingabefehler
— Zeitverluste in der Prozeßsteuerung durch manuelle Bewertung und Ausführung der Regeloperationen und entsprechende Hintergrundinformationen.

Allein diese Probleme erfordern die Rationalisierung deran stehenden Arbeiten durch den verstärkten und durchgängigen Einsatz von Rechentechnik.

4. Inhaltliche Zielstellungen bei der Realisierung eines CIM-Betriebes [5]

Bei der weiteren Gestaltung des Automatisierungsprozesses kann zwischen der Automatierung der Prozesse im flexiblen Fertigungssystem (FFS) und den weiteren Bereichen unterschieden werden.

4.1. Automatisierung im FFS

Im FFS sind 2 Gesichtspunkte bei der weiteren Bearbeitung von wesentlicher Bedeutung. Zum einen die Beziehung zwischen den Menschen und Maschinen (Mensch-Maschine-Schnittstellen) und zum anderen die Realisierung des durchgängigen Informationsflusses innerhalb des Gesamtsystems.

4.2. Automatisierung der anderen Bereiche

Als wesentliche Zielstellung steht die Erhöhung der Effektivität in der betrieblichen Planung sowie beim gesamten Steuerungsprozeß der Fertigung. Dazu sind in der Folge weitere Schritte in den einzelnen Fertigungsbereichen zu unternehmen:

— Intensivere Nutzung des Planungsprojekts P23 bei Erweiterung des Teils der Kapazitätsrechnung hinsichtlich der Feinplanung bis auf Schichtgenauigkeit. Dazu ist zu gewährleisten, daß ein flexibler Änderungsdienst der betrieblichen Stammdaten als Basis des Projekts P23 und die PPS durch eine Verkürzung des Änderungszeitraumes der Stammdaten von bisher minimal einer Woche auf maximal 24 h bis zur Einbeziehung in Planungsprojekte realisiert wird.
— Gleichzeitig ist eine umfassende und durchgängige Nutzung der PPS in höherer Qualität auch durch eine Neugestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstellen sowie die weitere Erhöhung der Freiheitsgrade der Steuerung des Produktionsprozesses notwendig. Dazu sind speziell Arbeiten für die Realisierung des Dispatcher-(Meister-)Arbeitsplatzes in mehreren Stufen notwendig.

Um die Zielstellung zur Entwicklung des CIM-Betriebes zu erreichen, ist schrittweise eine neue Qualität in der Organisationsprojektierung und Softwareentwicklung zu schaffen.
Dazu notwendige Mittel und Methoden sind:

— weitestgehende Vereinheitlichung der innerbetrieblich verwendeten Betriebssysteme
— weitestgehende Vereinheitlichung beim Einsatz problemorientierter Programmiersysteme und Sprachen (bei Vermeidung der Assemblerprogrammierung)
— modularer standardisierter Programmaufbau einschließlich der Bildschirm- und Druckgestaltung zur Vermeidung überflüssiger Entwicklungszeiten einerseits und zur Vermeidung von Eingewöhnungszeiten andererseits
— Anwendung einheitlicher Methoden der Softwaretechnologie und einzusetzender Entwicklungs- und Testwerkzeuge
— Aufbau der Dokumentationen (Problem-, Nutzer-, Programmdokumentation) nach einheitlichen und in Standards festgelegten Vorgaben.

Es wird eingeschätzt, daß durch diese Mittel und Methoden neben der Qualitätserhöhung und Verbesserung der Nutzerfreundlichkeit z. B. eine Rationalisierung bei der Organisationsprojektierung und Softwareentwicklung von etwa 15 bis 20 % erreichbar ist. eine

Senkung der Durchlaufzeiten der Fertigung (%)

! Beginn	! nach dem 1. Jahr	! nach dem 2. Jahr	! nach dem 3. Jahr
!	! 5	! 5	! 10

eine Steigerung der Arbeitsproduktivität auf der Basis der IWP bzw. der Nettoproduktion (%)

!	! 2	! 2	! 6

ein Gewinn- bzw. Nettogewinnzuwachs durch Materialkostensenkung bzw. Aufwandssenkung (%)

!	! 2	! 2	! 2

und Verkürzung der Entwicklungs- und Überleitungszeiten (%)

! 5	! 5	! 10	! 10 bis 20

erreichbar ist. Die angegebenen Größen stellen Zielgrößen dar, die sich auf der Grundlage von internationalen Einzellösungen berechnen lassen. Zu beachten ist bei einer Realisierung von CIM-Lösungen das schnelle Wachstumsvermögen der Mikroelektronik und Rechentechnik. Deshalb sind für Realisierungsetappen keine großen Zeitabstände zu wählen.

Literatur

[1] *Armbrüster, N.; Groß, H.:* Antriebe für Werkzeugmaschinen. Siemens Produktionsinformation 5 (1985) 2, Automatisierungstechnik
[2] *Ebert, D.:* Teilaufgaben zur rechnergestützten Erzeugnisentwicklung. TU Dresden, Sektion Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen 1987
[3] Programm REBUS II, AUTOTECH-PRO Forschungszentrum des Werkzeugmaschinenbaues Karl-Marx-Stadt 1987
[4] *Birth, M.; Galwelat, M.; Strelow, R.:* Integrierter CAD-Einsatz bei der Auslegung von Motorbauteilen. Sonderdruck aus VDI-Berichte 610.2, 1986
[5] Konzeption für den Ausbau eines CIM-Beispielbetriebes, VEB NILES Stellantriebe Dresden 1987

EA 5842

Mikrorechnergesteuerter, linearer Positionierantrieb mit Elementarschrittweiten unter 10 μm

H. Timmel; U. Jugel, Karl-Marx-Stadt

Herrn Prof. Dr. sc. techn. *Peter-Klaus Budig* zum 60. Geburtstag gewidmet

Schrittantriebe, insbesondere rotatorische, haben sich in der heutigen Technik ein breites Anwendungsgebiet erobert. Das war nicht zuletzt durch die rasche Entwicklung der Mikrorechentechnik und Erfolge auf dem Gebiet der Leistungselektronik möglich, die eine ökonomische Umsetzung dieser technischen Lösung ermöglichten. Vorrangig in Geräten der Informationsverarbeitung, wie elektronische Schreibmaschinen, Drucker und Plotter, in Manipulatoren oder Maschinen der Feingerätetechnik sind sie nicht mehr wegzudenken.

Zahlreiche Applikationen, vorrangig aus dem Haupteinsatzgebiet Positioniervorgänge, erfordern jedoch lineare Bewegungsabläufe. Dazu werden entweder die rotatorischen Bewegungen umgeformt oder spezielle lineare Schrittantriebe eingesetzt. Besonders vorteilhaft sind bei dezentral realisierten linearen Antriebsfunktionen zweisträngige Linearschrittmotoren, die sehr einfach aufgebaut sind.

Der Bewegungsablauf kann einerseits mit Hilfe einer offenen Steuerkette erreicht werden (Bild 1a) — die Steuerkette zeichnet sich durch relativ geringen technischen Aufwand aus —, andererseits ist mit Hilfe einer geschlossenen Regelschleife der Aufbau (Bild 1b) eines rückgekoppelten Antriebssystems für hohe Qualitätsansprüche bezüglich dynamischer und statischer Eigenschaften unabhängig von Parameterstreuungen und Störungen möglich.

Nachfolgend wird die Variante eines mikrorechnergesteuerten Linearmotors näher betrachtet. Durch eine quasianaloge Ansteuerung des Schrittmotors wird die Untergliederung der elektromagnetischen Schrittweite möglich. Der vorgestellte Antrieb wurde an der Sektion Automatisierungstechnik der Technischen Universität Karl-Marx-Stadt als Experimentalaufbau realisiert.

1. Linearer Reluktanzschrittmotor

1.1. Aufbau

Der Motor besteht aus einer beweglichen (Läufer) und einer feststehenden Baugruppe (Ständer) — Bild 2. Die feststehende Baugruppe besteht im Prinzip aus einer ferromagnetischen Platte, auf deren Oberfläche in einer Koordinatenrichtung Zähne und Nuten ausgebildet sind, die sich über die aktive Breite des Motors erstrecken. Die Zahnbreite wird normalerweise gleich der Nutbreite ausgeführt und liegt im Bereich von etwa 1/3 mm bis 1,5 mm. Die Nuttiefe ist aus magnetischen Gründen etwa 0,8 bis 1,5mal so groß wie die Nutbreite zu wählen.

Die bewegliche Baugruppe besteht aus zwei ferromagnetischen Kernen, die über einen Permanentmagneten (Maniperm, SmCo) miteinander verbunden sind. Jeder Kern trägt eine Spule und ist an seinen Polschuhpartien mit Nuten ausgestattet, die in ihren Abmessungen denen des feststehenden Teils entsprechen. Die Nuten der beiden Polschuhe eines Kernes haben gegeneinander eine Verschiebung um eine Nutbreite $b_n = \tau/2$. Die Kerne sind so zu montieren, daß sie gegeneinander um eine halbe Nutbreite $b_n/2$ verschoben sind (Bilder 2 und 3).

Die Fertigung und Montage dieser Läuferbaugruppe erfordert hohe Präzision. Die Beweglichkeit des Läufers wird mit Hilfe von Wälzlagern oder wesentlich eleganter durch Luftlagerung erreicht. Dabei ist der Luftspalt $\delta < b_n/5$ zu realisieren. Bild 3 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Magnetkreises.

1.2. Wirkungsweise und Betriebsverhalten

Der Motor entwickelt eine Kraft infolge der Veränderung der Energie des magnetischen Feldes im Luftspalt längs eines ausgeführten Schrittes. Die Energie des magnetischen Feldes ist infolge der Zahnteilung eine Funktion des Weges. Die Kraft beträgt $F = -\mathrm{d}W_{magn}/\mathrm{d}x_m = -\Phi^2\,\mathrm{d}R_m/\mathrm{d}x_m$, wobei $\mathrm{d}R_m/\mathrm{d}x_m$ die Änderung des magnetischen Widerstandes (Reluktanz) entlang des zurückgelegten Weges ist.

Zunächst soll der herkömmliche Schrittbetrieb durch sequentielle Umschaltung der Stromrichtungen in den zwei Läuferspulen (bipolare Zweistranganssteuerung) mit Hilfe des Bildes 2 dargestellt werden. Der Permanentmagnet erzeugt den magnetischen Fluß Φ_0. Wird der Elektromagnet 1 mit einem solchen Strom gespeist, daß der magnetische Fluß vom Elektromagneten 1 $\Phi_1 = \Phi_0/2$ erreicht, so ergibt sich für den Gesamtfluß im Luftspalt von Pol 1 Φ_0 und im

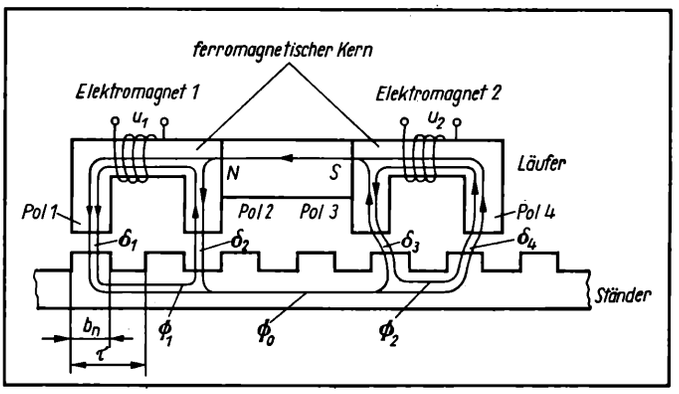


Bild 2. Prinzipieller Aufbau des linearen Schrittmotors

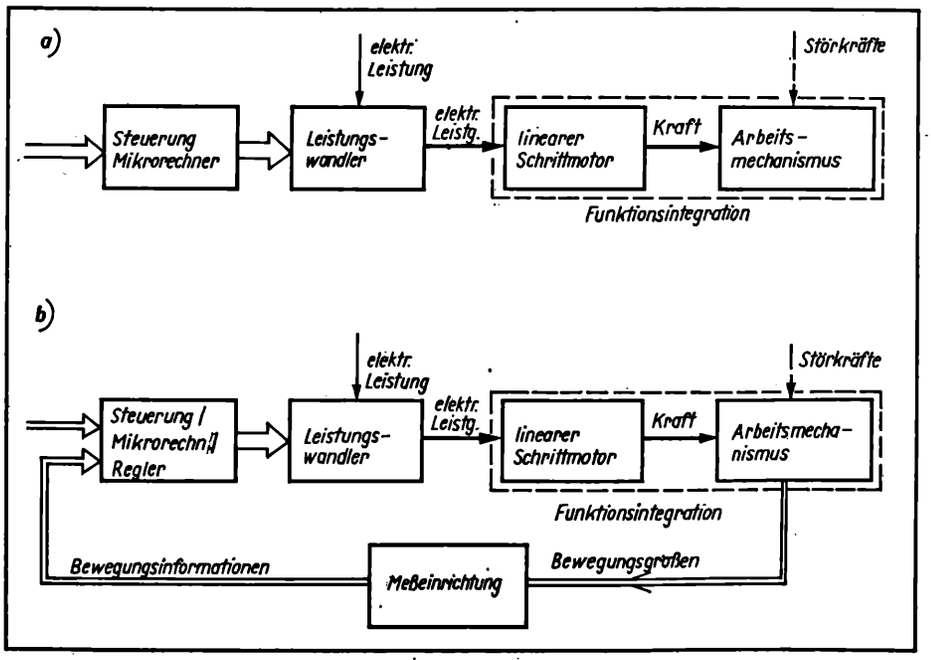


Bild 1. Prinzipielle Strukturen von Linearmotorschrittantrieben

Dr. sc. techn. *Heinz Timmel* ist Lektor, Dr.-Ing. *Ulrich Jugel* ist wissenschaftlicher Assistent an der Sektion Automatisierungstechnik der TU Karl-Marx-Stadt.

Bild 3. Magnetkreis des linearen Schrittmotors

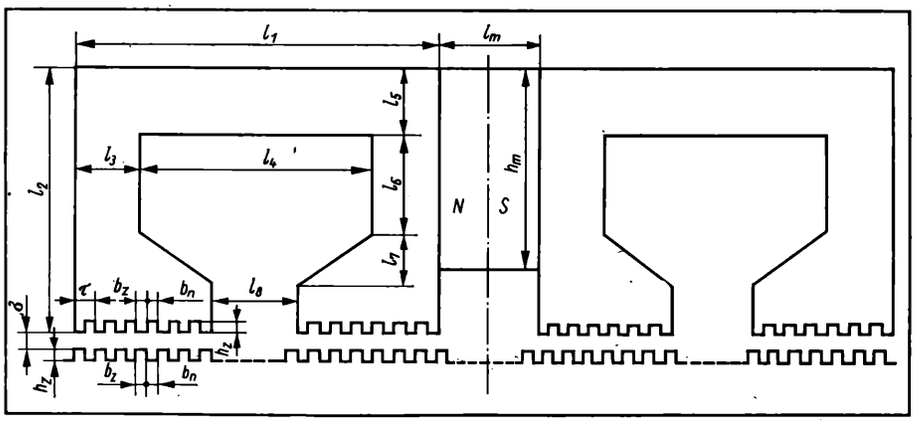


Bild 4. Verlauf der Phasenströme i_1, i_2 des linearen Schrittmotors bei stetiger Bewegung des Läufers von Position 1 zu Position 2

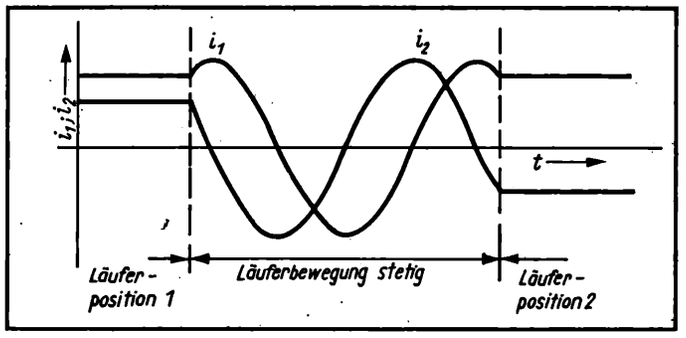
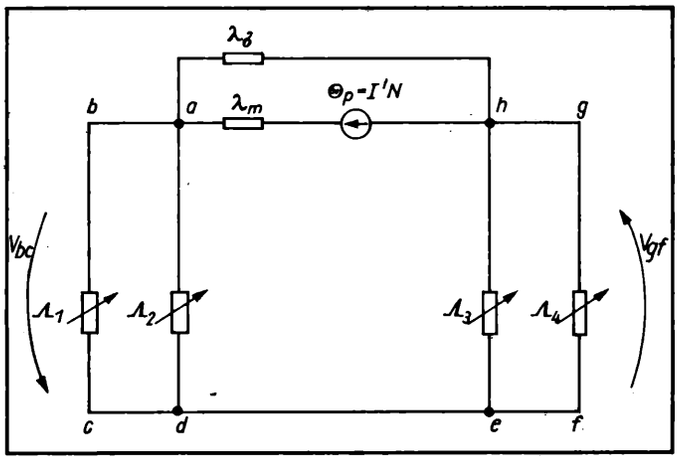


Bild 5. Ersatzschaltbild des Magnetkreises des Permanentmagneten



Spalt von Pol 2 0. Der Läufer bleibt in der abgebildeten Stellung stehen, da die Magnetfeldenergie in dieser Stellung minimal ist. Soll er nun einen Schritt $\Delta x_m = b_n/2$ nach links bewegt werden, so wird Elektromagnet 1 abgeschaltet und in den Elektromagneten 2 ein Strom eingespeist, der einen magnetischen Fluß Φ_0 erzeugt, wodurch der Gesamtfluß in Pol 3 zu 0 und der Gesamtfluß in Pol 4 verdoppelt wird. Da sich die magnetische Energie W_{magn} bei einer Verschiebung um $b_n/2 = \tau/4$ verringern kann, bewegt sich der Läufer um einen Schritt nach links. Wäre der Strom in entgegengesetzter Richtung eingespeist worden, hätte sich der Läufer um einen Schritt $\Delta x_m = b_n/2 = \tau/4$ nach rechts bewegt usw.

Im folgenden wird der Sonderfall der Speisung des vorgestellten Motors mit einem zweiphasigen Sinusstromsystem näher untersucht (Bild 4).

Im Zusammenhang mit der digitalen Rechentechnik zur Steuerung des Antriebes ergibt eine quasianaloge Betriebsweise über Pulsweitenmodulation die weitere Untergliederung der elektromagnetischen Schrittweite des Motors (Δx_m). Dieser Sachverhalt wird im folgenden als elektronische Schrittweiteninterpolation bezeichnet.

1.2.1. Das statische Betriebsverhalten

Aufbauend auf die Theorie synchroner Reluktanzmotoren werden zunächst folgende Vereinbarungen getroffen:

— Die vom Permanentmagneten herrührenden Induktionen $B(x)$ in den Arbeitsspalten unter den Polpartien sollen durch eine Funktion des Typs

$$B(x) = B_0 + B_1 \cos(x + \varphi) \text{ mit } x = \frac{2\pi}{\tau} x_m$$

beschreibbar sein.

— Die elektromagnetische Kopplung zwischen den zwei Spulen sei vernachlässigbar.

— Die Magnetkreise seien sättigungsfrei; in den Eisenteilen wird $\mu_{rel} \to \infty$ angenommen.

— Die Magnetflußstreuung wird für eine erste Näherung vernachlässigt.

— Der Strom in den Spulen soll den sinusförmigen Spulenspannungen u_1, u_2 ohne Phasenverschiebung folgen.

Die statische Funktion $F = f(x_m)$ kann für die vorliegende Magnetkreisanordnung aus der Energiebilanz abgeleitet werden:

$$dW_{el} = dW_{magn} + dW_m. \tag{1}$$

Im statischen Fall ist wegen u_ν und $i_\nu \equiv$ const $dW_{el} = 0$. Es gilt

$$0 = dW_{magn} + dW_m \tag{2}$$

mit

$$dW_m = F(x_m)\, dx_m. \tag{3}$$

Für die Schubkraft kann damit geschrieben werden:

$$F(x_m) = -\frac{dW_{magn}(\psi, x_m)}{dx_m} = -\frac{2\pi}{\tau}\frac{dW_{magn}(\psi, x)}{dx}. \tag{4}$$

Die magnetische Energie der Motoranordnung beträgt

$$W_{magn}(\psi, x) = \frac{1}{2}(i_1\psi_1 + i_2\psi_2). \tag{5}$$

Die Schubkraft $F(x)$ kann damit in der Form

$$F(x) = -\frac{\pi}{\tau}\frac{d(i_1\psi_1 + i_2\psi_2)}{dx} \tag{6}$$

dargestellt werden. Bei gegebenen Phasenströmen i_1, i_2 sind die Flußverkettungen ψ_1, ψ_2 als Funktionen des Verschiebewinkels x bzw. Verschiebeweges x_m zu bestimmen.

Zunächst soll ermittelt werden, wie sich die magnetischen Flüsse des Permanentmagneten in Abhängigkeit vom Verschiebewinkel x durch die Polpartien ändern. Diese Flüsse sind teilweise mit denen der Phasenspulen verkettet.

Das Ersatzschaltbild des Magnetkreises des Permanentmagneten (Bild 5) dient als Berechnungsgrundlage.

Für die magnetischen Leitwerte an den Polen setzt man voraussetzungsgemäß die folgenden Funktionen an:

$$\Lambda_1(x) = \lambda_0 + \lambda_1 \cos x;\ \Lambda_2(x) = \lambda_0 - \lambda_1 \cos x,$$
$$\Lambda_3(x) = \lambda_0 + \lambda_1 \sin x;\ \Lambda_4(x) = \lambda_0 - \lambda_1 \sin x. \tag{7}$$

Die Bestimmung des realen, quantitativen Verlaufes des magnetischen Leitwertes im Luftspaltbereich setzt die genaue Kenntnis des Verlaufes der Induktion voraus. Moderne numerische Magnetfeldberechnungsverfahren (z.B. Verfahren der finiten Differenzen bzw. finiter Elemente [7] [8]) ermöglichen die Vorausberechnung der Magnetfeldverteilung. Hier werden Ergebnisse zugrunde gelegt, wie sie nach [1] mit Hilfe einer experimentellen Modellierung auf Leitfähigkeitspapier gewonnen wurden (Bild 6). Mit den spezifischen Leitwerten G_0 und G_1 aus Bild 6 können die Leitwerte λ_0 und λ_1 bestimmt werden:

$$\lambda_0 = z_p \gamma_{Fe} l_z G_0,$$
$$\lambda_1 = z_p \gamma_{Fe} l_z G_1. \tag{8}$$

z_p Anzahl der Zähne je Polpartie
γ_{Fe} Eisenfüllfaktor
l_z Breite des Magnetkerns.

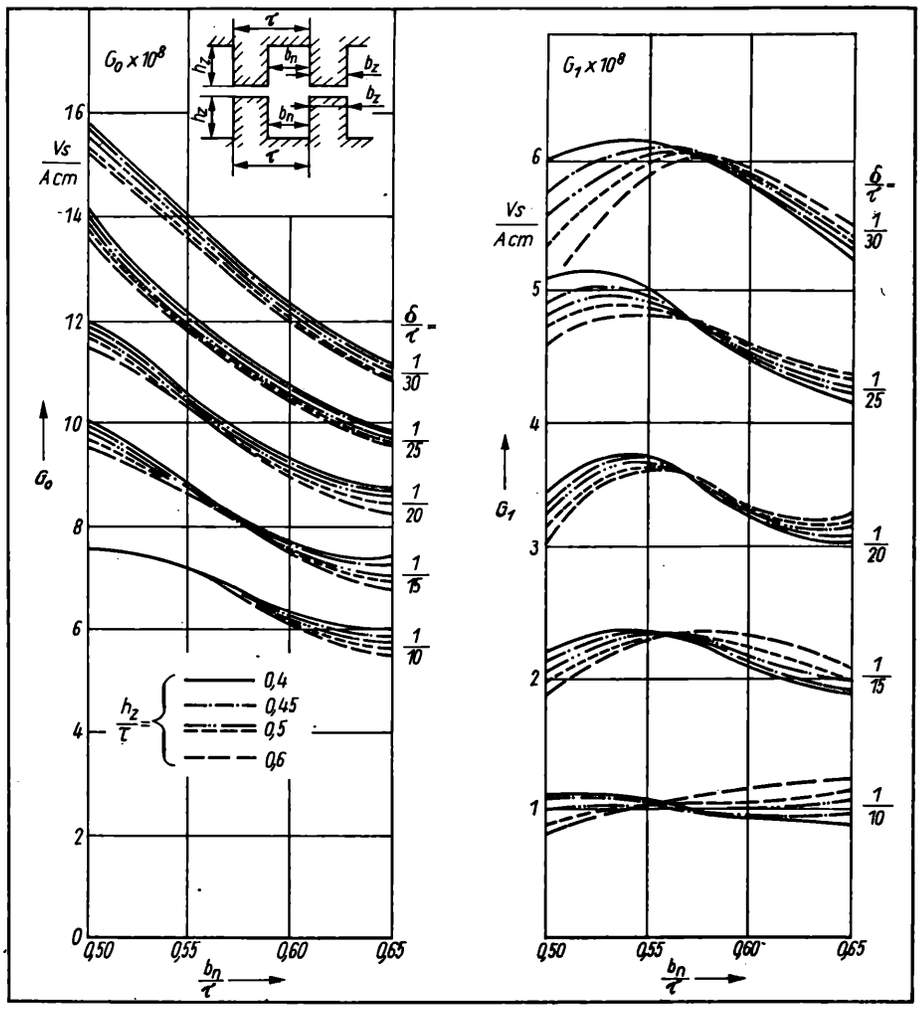


Bild 6. Die spezifischen magnetischen Leitwerte G_0 und G_1 als Funktion geometrischer Abmessungen (nach [1])

Die angenommenen Näherungen erweisen sich für weitere theoretische Betrachtungen als tragfähig.
Es ist leicht zu erkennen, daß die Gesamtleitwerte für jeden Eisenkern (Λ_{ad}, Λ_{he}) verschiebungsunabhängig und gleich groß sind:

$$\Lambda_{ad} = \Lambda_1(x) + \Lambda_2(x) = 2\lambda_0,$$
$$\Lambda_{he} = \Lambda_3(x) + \Lambda_4(x) = 2\lambda_0. \tag{9}$$

Der magnetische Gesamtleitwert der Kerne ist damit

$$\lambda_\delta = \frac{\Lambda_{\delta d}\,\Lambda_{he}}{\Lambda_{ad} + \Lambda_{he}} = \lambda_0. \tag{10}$$

Der Fluß des Permanentmagneten ist verschiebungswegunabhängig und konstant. Bei Vernachlässigung des Streuleitwertes λ_σ ergibt sich:

$$\Phi_0 = \frac{\Theta_p}{R_{m\delta} + R_{mp}} = \Theta_p \frac{\Lambda_\delta \lambda_m}{\Lambda_\delta + \lambda_m} = \Theta_p \frac{\lambda_0 \lambda_m}{\lambda_0 + \lambda_m}. \tag{11}$$

Die vom Permanentmagneten angetriebenen Polflüsse sind:

$$\Phi_1(x) = V_{bc}\Lambda_1 = \frac{\Phi_0}{2\lambda_0}(\lambda_0 + \lambda_1 \cos x) = \frac{1}{2}\Phi_0 + \frac{1}{2}\Phi_0\frac{\lambda_1}{\lambda_0}\cos x,$$
$$\Phi_2(x) = V_{bc}\Lambda_2 = \frac{\Phi_0}{2\lambda_0}(\lambda_0 - \lambda_1 \cos x) = \frac{1}{2}\Phi_0 - \frac{1}{2}\Phi_0\frac{\lambda_1}{\lambda_0}\cos x,$$
$$\Phi_3(x) = V_{gf}\Lambda_3 = \frac{\Phi_0}{2\lambda_0}(\lambda_0 + \lambda_1 \sin x) = \frac{1}{2}\Phi_0 + \frac{1}{2}\Phi_0\frac{\lambda_1}{\lambda_0}\sin x,$$
$$\Phi_4(x) = V_{gf}\Lambda_4 = \frac{\Phi_0}{2\lambda_0}(\lambda_0 - \lambda_1 \sin x) = \frac{1}{2}\Phi_0 - \frac{1}{2}\Phi_0\frac{\lambda_1}{\lambda_0}\sin x. \tag{12}$$

Die Analyse zeigt, daß sich die Flüsse unter den Polen 1 bis 4 bei Verschiebung des Läufers um den Mittelwert 1/2 Φ_0 nach Sinus- bzw. Kosinusfunktionen mit der Amplitude 1/2 λ_1/λ_0 Φ_0 ändern.
Die Flußverkettungen der Phasenspulen mit von den Phasenströmen herrührenden Flüssen sind für den statischen Fall nahezu konstant, d. h. unabhängig von der Läuferverschiebung:

$$\psi_{sp1} \approx N(Ni_1)\frac{\lambda_0}{2}; \quad \psi_{sp2} \approx N(Ni_2)\frac{\lambda_0}{2}. \tag{13}$$

N Windungszahl einer Phasenspule.

Damit sind die Flußverkettungen ψ_1, ψ_2 bekannt (vgl. Bild 2):

$$\psi_1 = \psi_{sp1} + \psi_1(x) = \frac{N}{2}(Ni_1)\lambda_0 + \frac{N}{2}\Phi_0\left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_0}\cos x\right),$$
$$\psi_2 = \psi_{sp2} + \psi_4(x) = \frac{N}{2}(Ni_2)\lambda_0 + \frac{N}{2}\Phi_0\left(1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_0}\sin x\right). \tag{14}$$

Mit $\psi_m = 1/2\,\lambda_1/\lambda_0\,N\,\Phi_0$ kann nun nach Gl. (6) die Schubkraft F als Funktion des Auslenkwinkels x bzw. des Auslenkweges x_m bestimmt werden:

$$F(x) = -\frac{\pi}{\tau}\left(\frac{d(i_1\psi_1)}{dx} + \frac{d(i_2\psi_2)}{dx}\right)$$
$$= -\frac{\pi}{\tau}\left(-i_1\frac{N}{2}\Phi_0\frac{\lambda_1}{\lambda_0}\sin x - i_2\frac{N}{2}\Phi_0\frac{\lambda_1}{\lambda_0}\cos x\right),$$
$$F(x) = \frac{\pi}{\tau}\psi_m(i_1\sin x + i_2\cos x). \tag{15}$$

Die Phasenspulenströme sollen voraussetzungsgemäß im statischen Betieb die folgenden Wertepaare annehmen:

$$i_1 = I_m\cos\gamma;\ i_2 = I_m\sin\gamma \tag{16}$$

γ Phasenwinkel.
Werden diese Werte in Gl. (15) eingesetzt und der mathematische Zusammenhang

$$\sin x\cos\gamma - \cos x\sin\gamma = \sin(x-\gamma)$$

beachtet, ergibt sich schließlich für die Abhängigkeit der Schubkraft vom Verschiebewinkel $\Delta x = x - \gamma$

$$F(x) = \frac{\pi}{\tau}\psi_m I_m\sin(x-\gamma) = \frac{\pi}{\tau}\psi_m I_m\sin\Delta x. \tag{17}$$

Wird eine konstante Schubkraft F vom Läufer gefordert, ist es notwendig, daß der Winkel $\Delta x = x - \gamma$ unverändert bleibt. Das gilt sowohl im Stillstand als auch bei Bewegung des Läufers [$x = x(t)$].

$$\Delta x = x - \gamma = \text{const} \tag{18}$$

Für $x - \gamma = +\frac{\pi}{2}$ wird die Kraft maximal groß:

$$F_m = \frac{\pi}{\tau}\psi_m I_m. \tag{19}$$

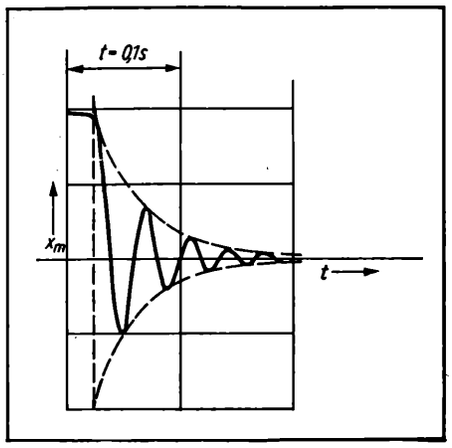


Bild 7
Einschwingvorgang
$x_m = f(t)$

Aus Gl. (18) erhält man die Gesetzmäßigkeit, nach der der Winkel γ geändert werden muß, um eine konstante Schubkraft über einen beliebig langen Verschiebeweg aufrechtzuerhalten:

$$\gamma = x - \Delta x \quad \text{mit } \Delta x = 0 \cdots \frac{\pi}{2} \text{ und } x = \frac{2\pi}{\tau} x_m .$$

Soll die Maximalkraft F_m aufrechterhalten werden, gilt $\Delta x = \pi/2$ und $\gamma = x - \pi/2$. Für die Phasenströme ergibt sich in diesem Fall

$$i_1 = I_m \cos\gamma = I_m \cos\left(x - \frac{\pi}{2}\right) = I_m \sin x ,$$

$$i_2 = -I_m \sin\gamma = -I_m \sin\left(x - \frac{\pi}{2}\right) = I_m \cos x . \tag{20}$$

Es soll noch der Fall betrachtet werden, daß $\gamma = \omega t = 2\pi t/T$ ist. Der Winkel x ändert sich bei $\Delta x = 0$ (Leerlauf) wie der Winkel γ:

$$x = \gamma \rightsquigarrow \frac{2\pi}{\tau} x_m = \frac{2\pi}{T} t = 2\pi f \cdot t = \omega t .$$

Mit $x_m/t = v$ erhält man für die Vorschubgeschwindigkeit

$$v = f \cdot \tau . \tag{21}$$

Nun ist noch der optimale Wert der Amplitude der Phasenströme I_m zu bestimmen. Der Maximalwert dieser Ströme wird für den anzustrebenden Fall bestimmt, daß sich im Pol 1 der magnetische Fluß verdoppelt und im Pol 2 aufhebt:

$$\Theta_{sp\,max} = I_m N = \frac{1}{2}\Phi_0 \Big/ \frac{\lambda_0}{2} ,$$

$$I_m = \frac{1}{\lambda_0 N}\Phi_0 . \tag{22}$$

1.2.2. Bemerkungen zum dynamischen Betriebsverhalten

Die prinzipiellen Systemgleichungen des linearen Schrittmotors umfassen die Spannungsdifferentialgleichungen der beiden Erregerwicklungen, die Kraftgleichung und die mechanische Grundgleichung:

$$u_1 = i_1 R_s + e_1(x_m, t) = i_1 R_s + \frac{d\psi_1(x_m, t)}{dt}$$

$$= i_1 R_s + L_s(x_m)\frac{di_1}{dt} + \frac{dL_s(x_m)}{dx_m}\frac{dx_m}{dt} i_1 , \tag{23}$$

$$u_2 = i_2 R_s + e_2(x_m, t) = i_2 R_s + \frac{d\psi_2(x_m, t)}{dt}$$

$$= i_2 R_s + L_s(x_m)\frac{di_2}{dt} + \frac{dL_s(x_m)}{dx_m}\frac{dx_m}{dt} i_2 , \tag{24}$$

$$F = \frac{\pi}{\tau}\psi_m I_m \sin(x - \gamma) , \tag{25}$$

$$F - F_w(t) - F_D(t) - F_R - m\frac{d^2x_m}{dt^2} = 0 . \tag{26}$$

Die (rechnergestützte) Lösung dieses Gleichungssystems beschreibt das dynamische Betriebsverhalten. In den Gleichungen bedeuten:

u_1, u_2	Spannungen an den Steuerspulen
i_1, i_2	Ströme in den Steuerspulen
R_S	Steuerspulenwiderstand
L_S	Steuerspuleninduktivität
e_1, e_2	induzierte Gegenspannungen
ψ_1, ψ_2	Flußverkettungen mit den Steuerspulen
t	Zeit
x_m	Weg
F_w	extern angreifende Gegenkraft

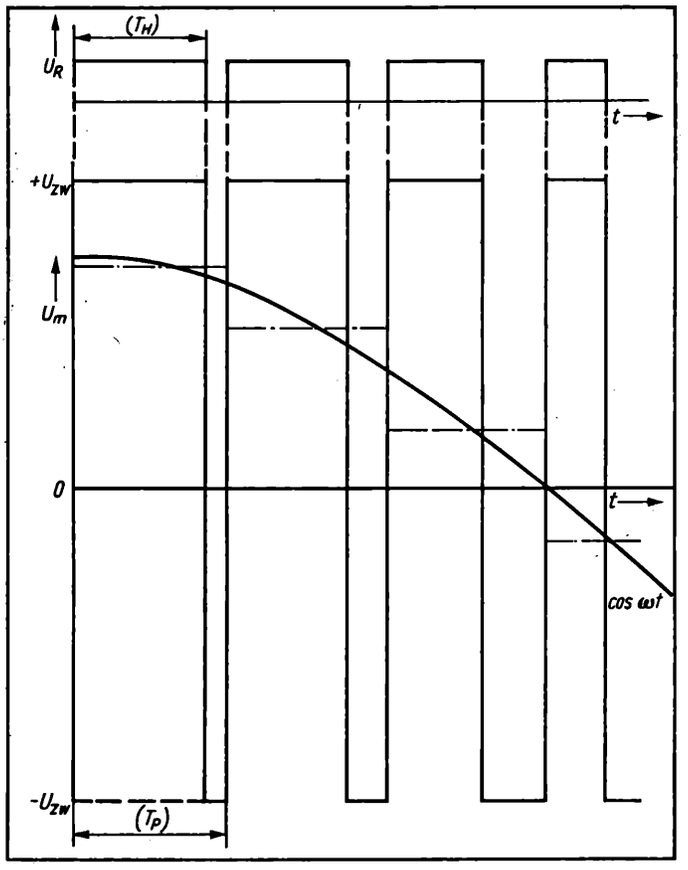


Bild 8. Prinzip der Pulsweitenmodulation

F_D	geschwindigkeitsproportionale Dämpfungskraft in Auswirkung von Wirbelströmen und Gegeninduktionen
F_R	zeitinvariante Reibkraft (wird zunächst vernachlässigt)
m	bewegte Motormasse.

Die Modellierung des Motors und die komplexe Lösung des Differentialgleichungssystems stellen eine komplizierte Aufgabe dar. Von den Übergangsvorgängen soll im folgenden nur das Störverhalten unter der Annahme kleiner Auslenkwege betrachtet werden. Der reluktante Linearschrittmotor ist auf Grund seines Funktionsprinzips ein schwingungsfähiges „Feder-Masse-System".
Ausgangspunkt der dynamischen Beschreibung soll die Bewegungsgleichung des Läufers im Leerlauf ($F_w = 0$) sein:

$$\Delta F - \Delta F_D - \Delta F_B = 0. \tag{27}$$

Für die Kraft ΔF des linearen Schrittmotors bei kleinen Auslenkungen ($\sin \Delta x \approx \Delta x$) kann bei linearisierter Betrachtung geschrieben werden:

$$\Delta F \approx F_m \Delta x = F_m \frac{2\pi}{\tau}\Delta x_m . \tag{28}$$

Die Beschleunigungskraft ΔF_B wird mit

$$\Delta F_B = m\frac{d^2x_m}{dt^2} \tag{29}$$

bestimmt. Für die geschwindigkeitsproportionale Dämpfungskraft wird

$$\Delta F_D = 2B\frac{dx_m}{dt} \tag{30}$$

angesetzt. Damit erhält man die Bewegungsgleichung des Läufers:

$$m\frac{d^2x_m}{dt^2} + 2B\frac{dx_m}{dt} + F_m\frac{2\pi}{\tau}x_m = 0 . \tag{31}$$

$2B$ Dämpfungskoeffizient.
Die Lösung dieser linearen Differentialgleichung 2. Ordnung hat für vorauszusetzende kleine Dämpfung ($\delta^2 < \omega_0^2$) die Form einer freien gedämpften Schwingung:

$$x_m = X_0 e^{-\delta t}\cos(\omega_1 t - \alpha). \tag{32}$$

X_0	maximaler Auslenkweg
$\delta = \frac{B}{m}$	Dämpfungskoeffizient

$\frac{1}{\delta}$ Dämpfungszeitkonstante

$\omega_1 = 2\pi f_1$ Eigenkreisfrequenz

$\omega_1^2 = \omega_0^2 - \delta^2$.

$\omega_0 = \sqrt{\frac{2\pi F_m}{\tau m}}$,

$\alpha = \arctan \frac{\delta}{\omega_1}$.

Bild 7 zeigt ein Oszillogramm $x_m = f(t)$, aus dem ohne Schwierigkeiten die Eigenfrequenz f_1, der Dämpfungskoeffizient δ, die Dämpfungszeitkonstante $1/\delta$ und der Koeffizient der Gleitreibung $\mu = \Delta F_D/F_m \approx 2\,\delta/\omega_0$ bestimmt werden können.

2. Linearer Positionierantrieb

Für die Realisierung von Positionierantrieben unter Verwendung von Schrittmotoren gibt es zwei prinzipielle Wege.

Der notwendige Bewegungsablauf kann einerseits mit Hilfe einer offenen Steuerkette aufgebaut werden (Bild 1a), andererseits ist die Einbindung in einen geschlossenen Regelkreis (Bild 1b) möglich. Die Steuerkette zeichnet sich durch einen relativ geringen technischen Aufwand aus. Die Funktionen der Steuerströme werden dabei als Wertetabelle aus einem Speicher abgerufen oder nach einem bestimmten Algorithmus berechnet. Allerdings dürfen Belastungsänderungen (z.B. Störkräfte durch den technologischen Prozeß) ein bestimmtes Niveau nicht überschreiten, damit die Positioniergüte gewährleistet werden kann.

Das geregelte Antriebssystem genügt hinsichtlich dynamischer und statischer Eigenschaften höheren Anforderungen. Durch die Erfassung aktueller Bewegungsgrößen können Gegenkräfte und Parameterstreuungen in weiten Bereichen kompensiert werden. Allerdings ist damit ein höherer technischer Aufwand verbunden, der nur bei einigen Anwendungsfällen gerechtfertigt ist.

Soll die Positioniergenauigkeit größer sein als die Schrittweite $\Delta x_m = b_n/2$, so sind die Spulensysteme, unabhängig davon, ob ein gesteuerter oder geregelter Antrieb realisiert werden soll, entsprechend den Überlegungen in Abschn. 1, mit sinusförmigen Spannungen bzw. Strömen anzusteuern.

Im Hinblick auf die genutzte digitale Signalverarbeitung bieten sich hauptsächlich folgende Ansteuerprinzipien an:

— Spannungseinprägung mit Zeitkonstantentabelle (Pulsweitenmodulation)
— Stromeinprägung mit Amplitudentabelle und unterlagerter Stromregelung im Leistungssteller.

Der beschriebene reluktante Linearschrittmotor wurde in eine offene Steuerkette entsprechend Bild 1a) eingebaut. Sie besteht aus den Elementen:

— Steuerrechner auf K 1520-Basis
— 4-Quadranten-Transistorpulssteller
— reluktanter Linearschrittmotor
— Belastungseinrichtung für statische Gegenkraftverläufe.

Auf Grund der relativ einfachen Hardwarekonfiguration und der unproblematischen Software wurde zur Ansteuerung eine Spannungseinprägung gewählt.

2.1. Steuerrechner und seine Funktion im Antriebssystem

Der Steuerrechner besteht aus den Hauptbaugruppen

— CPU auf der Basis des U 880
— Speicherplatine 4 kByte EPROM U 555
1 kByte RAM U 202
(zur Ablage des Steuerprogrammes und der Tabelle sind 964 Byte notwendig)
— PIO-Platine
— CTC-Platine auf der Basis des U 857
— Reset-Platine.

Der Rechner hat die Aufgabe, mit Hilfe eines geeigneten Steuerprogramms folgende Anforderungen zu realisieren:

— Ansteuerung des Transistorpulsstellers mit pulsweitenmodulierten Rechteckblöcken zur Realisierung näherungsweise sinus- bzw. kosinusförmiger Spannungen für die Speisung der Motorwicklungen
— Auflösung des Schrittes Δx in 240 Teilschritte unter Nutzung der 8-bit-Verarbeitungsbreite zur Pulsweitenmodulation
— Gewährleistung der vollen Haltekraft in jeder Stillstandsposition des Motors durch die Aufrechterhaltung der Augenblickswerte des 2-Phasen-Stromsystems.

Durch Festlegung der je Vollperiode durch Pulsweitenmodulation erreichbaren Spannungswerte auf 240 wird eine Phasenwinkelauflösung von

$$\Delta x_e = \frac{360°}{240} = 1{,}5°$$

erreicht. Das ergibt für den Antrieb eine elementare Läuferverschiebung von

$$\Delta x_{me} = \Delta x_e \frac{\tau}{2\pi}. \tag{33}$$

Bei einer Nutteilung $\tau = 2$ mm erhält man für den Elementarschritt

$$\Delta x_{me} = \frac{1{,}5°}{360°} \cdot 2\text{ mm} = 8{,}\overline{3}\ \mu\text{m}.$$

Die zu einer gewünschten Verschiebung x_m gehörende Elementarschrittzahl E berechnet sich nach

$$E = \frac{x_m}{\Delta x_{me}}. \tag{34}$$

Entsprechend der Beziehungen der Pulsweitenmodulation (vgl. Bild 8) ergibt sich für die Motorspannungen:

$$u_M = \left(\frac{T_H}{T_p} - 0{,}5\right) U_{zw}, \tag{35}$$

$$u_M = \hat{U}_M \sin(\Delta x_e \nu).$$

$\nu = 1{,}2 \cdots 240.$

U_{zw} Amplitude der Zwischenkreisspannung des Pulsstellers
$\hat{U}_M$ Amplitude der zu realisierenden Motorspannung
T_p Pulsperiodendauer der Pulsweitenmodulation
T_H Einschaltdauer des eine positive Motorspannung ergebenden Brückenzweiges.

Es gilt somit

$$T_H = 0{,}5\,T_p\left(1 + \frac{\hat{U}_M \sin(\Delta x_e \nu)}{0{,}5\,U_{zw}}\right). \tag{36}$$

Demnach reicht es aus, für jeden Wert ν den dazugehörigen T_H-Wert in Form einer Tabelle im Speicherbereich des Rechners abzulegen und nacheinander abzurufen, um die annähernd sinusförmige

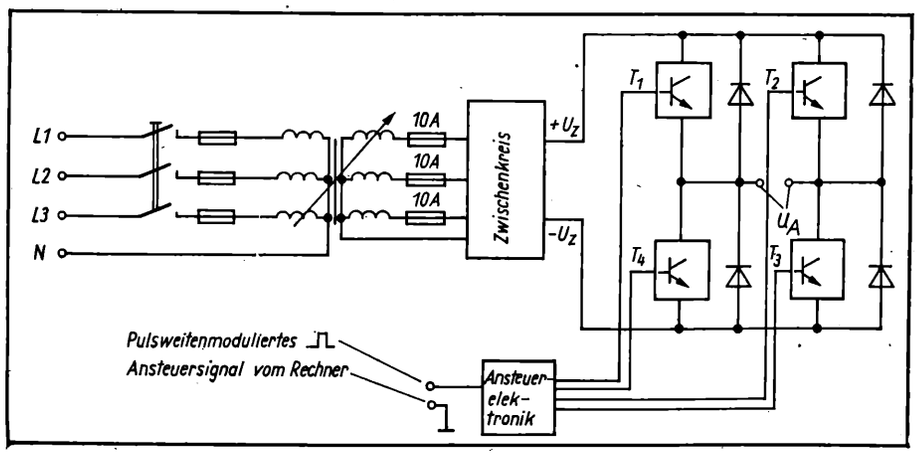


Bild 9. Prinzip des Transistorpulsstellers

Stufung der Motorspannungen zu erhalten. Das heißt, ausgehend von der momentanen Motorposition werden genausoviele T_H-Werte chronologisch aus der Tabelle ausgelesen, wie nach Steuervorgabe Elementarschritte zurückzulegen sind. Bei Tabellenende, T_H (360°—1,5°), wird, sofern die geforderte Schrittzahl E noch nicht erreicht wurde, an den Anfang der Tabelle, T_H (0°), gesprungen und ihre Abarbeitung fortgesetzt.

Um die beiden gegeneinander 90° phasenverschobenen Motorspannungen zu erhalten, wird zunächst der Wert T_H (y) aus dem Speicher gelesen und an den entsprechenden CTC-Kanal übergeben. Dann wird T_H ($\nu + 90°$) ausgelesen und an den zweiten CTC-Kanal übergeben. Durch geeignete Programmierung des Ausgabeprogramms beträgt die Ausgabedifferenz der zwei Werte maximal 15 Taktzyklen. (Das entspricht bei einer Taktfrequenz von 2,5 MHz → 6 µs, bei 4 MHz → 3,75 µs.). Mit einer programmierbaren Flipflop-Umschaltung von CTC-Kanälen wird die neue T_H für beide Kanäle der Pulsstelleransteuerung über Logikverknüpfung wirksam. Damit werden die T_H-Werte gleichzeitig an die beiden Transistorpulssteller übergeben und bewirken dann die entsprechenden Motorspannungen. Zur Richtungsumkehr wird die Tabelle in entgegengesetzter Richtung abgearbeitet.

Die gewünschte Anzahl der zurückzulegenden Elementarschritte wird über eine Tastatur als 16stellige Dualzahl eingegeben, wobei das höchstwertige Bit die Bewegungsrichtung festlegt. Die Eingabe erfolgt über den Peripherieschaltkreis U 855 (PIO).

2.2. Transistorpulssteller

Der Transistorpulssteller besteht aus den Baugruppen

— Netzteil für Ansteuerelektronik und Überwachungselektronik
— Gleichspannungszwischenkreis
— zwei Transistorbrücken.

Die vom Ansteuerrechner bereitgestellten Spannungsimpulse werden vom Transistorpulssteller verstärkt. Transistoren als zu schaltende Elemente ermöglichen eine hohe Schaltfrequenz und einen hohen Wirkungsgrad ($\eta \approx 90\,\%$), Das Schaltungsprinzip ist im Bild 9 dargestellt.

3. Meßergebnisse am Prototyp des Linearantriebs

In Versuchsreihen wurden beliebige Anzahlen von Schritten vorwärts und ohne Belastung (Leerlauf) ausgeführt. Anschließend wurde die Bewegungsrichtung umgekehrt und die gleiche Schrittzahl rückwärts ausgeführt. Versuchsergebnisse mit den entsprechenden Positionierfehlern sind in Tafel 1 zusammengefaßt.

Der Läufer kommt stets mit einem Fehler < 40 µm in die Ausgangsstellung zurück. Beim Lauf gegen eine Belastungskraft nach Gl. (18) addiert sich der dem Lastwinkel Δx entsprechende Fehlweg $\Delta x_m = \Delta x\,\tau/2\pi$ dazu ($\Delta x < \pi/2$; $\tau = 2$ mm). Die Reproduzierbarkeit des Ausgangspunktes unter statischer Last lag bei < 50 µm. Die Positioniergenauigkeit zeigte am Prototyp des Linearantriebes eine Abhängigkeit vom jeweils für den Verfahrvorgang genutzten Statorbereich (Statoranfang, -mitte, ...) bei gleicher Schrittzahl. Als Ursachen wurden ermittelt:

— Fertigungsungenauigkeiten der Nutteilungen und Nutgeometrie von Ständer und Läufer (die Fertigung erfordert hohe Präzision!)
— mechanische, reibungsbehaftete Wälzlagerung
— Abweichungen des Steuerspulenstromsystems von der theoretisch anzustrebenden Form (Ströme nicht exakt sinusförmig und nicht exakt 90° phasenverschoben).

Tafel 1. Meßergebnisse zur Positionierungsgenauigkeit des Schrittmotors bei $f = 30$ Hz und Leerlauf ($F_W = 0$)

		Positionierungsfehler (µm)				
ν	x	Versuchs-Nr.				
Schritte	mm	1	2	3	4	5
200	1,67	6	6	8	7	8
600	5,02	6	4	6	6	5
1400	11,66	2	6	10	8	− 2
3000	25	30	40	14	20	4
6200	51,66	2	38	20	28	−14
12600	105	40	36	38	12	36
25400	211,66	38	30	18	28	10

4. Zusammenfassung

Im Beitrag wird der Prototyp eines mikrorechnergesteuerten linearen Positionierantriebes mit Elementarschrittweiten unter 10 µm vorgestellt. Solche inkrementalen Positionierantriebe gewinnen zunehmend an Bedeutung. Ihr Einsatzgebiet liegt vorrangig in der Informationstechnik, der Feingerätetechnik, bei Industrierobotern und in der Textiltechnik. Durch die rasche Entwicklung von Rechentechnik und Leistungselektronik ergeben sich günstige Aspekte für die Ansteuerung von Schrittmotoren. So kann die Entwicklung derartiger Antriebe auch vom ökonomischen Gesichtspunkt her vertreten werden.

Aufbau, Wirkungsweise, statisches und dynamisches Betriebsverhalten des untersuchten reluktanten Linearmotors werden im Überblick dargestellt.

Es wird gezeigt, daß durch das Zusammenwirken von 8-bit-Mikrosteuerrechner, Transistorpulssteller und Linearschrittmotor ein Positionierantrieb mit Elementarschrittweiten unter 10 µm realisiert werden kann. Positionierfehler des Antriebs in offener Steuerkette resultieren aus Fertigungsungenauigkeiten des Motors, Störkräften durch Reibung und Belastung und Abweichungen von dem idealen 2-Phasen-Stromsystem.

Luftlagerung würde die Reibungskraft minimieren. Eine wesentliche Verbesserung der technischen Daten des Positionierantriebs kann erreicht werden, wenn die offene Steuerkette durch einen geschlossenen Regelkreis ersetzt wird.

Theorie des dynamischen Verhaltens von Drehstrom-Asynchronmotoren mit Stromverdrängungsläufer

U. Beckert; Freiberg

Mitteilung aus der Bergakademie Freiberg, Wissenschaftsbereich Elektrotechnik

Herrn Prof. Dr. sc. techn. *Peter-Klaus Budig* zum 60. Geburtstag gewidmet

Für eine Vielzahl praktisch wichtiger Probleme sind Kenntnisse der dynamischen Eigenschaften des Asynchronmotors erforderlich. Die Berechnung transienter Vorgänge bereitet infolge verschiedener physikalischer Nebeneffekte einige Schwierigkeiten. Im besonderen Maße gilt das dann, wenn die Stromverdrängung in den Läuferstäben berücksichtigt werden muß. Im folgenden wird ein geschlossenes, übersichtliches mathematisches Modell eines Asynchronmotors mit einer Mehrfachkäfigwicklung im Läufer entwickelt, mit dem die Stromverdrängungserscheinungen auch im dynamischen Betrieb berechnet werden können.

Dr.-Ing. *Ulrich Beckert* ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Bergakademie Freiberg, Wissenschaftsbereich Elektrotechnik.

Literatur

[1] *Tschilikin, M. G.:* Diskrete Elektroantriebe mit Schrittmotoren. Moskau: Energia 1971
[2] *Rauch, M.:* Gerätetechnische Spezialantriebe. Feingerätetechnik 34 (1985) 12, S. 547–549
[3] *Dittrich, P.; Döring, G.; Schatter, G.:* Schrittantriebe in Positioniersystemen der Gerätetechnik. Feingerätetechnik 32 (1983) 1, S. 6–11 (Teil 1); (1983) 2, S. 51–54 (Teil 2)
[4] *Kiehnscherf, R.; Rauch, M.:* Berechnung des Bewegungsverhaltens von gerätetechnischen Antriebssystemen mit reaktiven Linearschrittmotoren. Feingerätetechnik 32 (1983) 10, S. 454–457
[5] *Schönfeld, R.; Habiger, E.:* Automatisierte Elektroantriebe. Berlin: VEB Verlag Technik 1981
[6] *Tschikur, A.:* Positionierantrieb mit einem linearen Schrittmotor nach dem Reluktanzprinzip. Diplomarbeit 1986, TH Karl-Marx-Stadt
[7] *Halle, H.; Pohl, A.:* Numerische Feldberechnung — ein modernes Instrument der Berechnung elektrischer Maschinen. ELEKTRIE, Berlin (1984) 7, 245–247
[8] *Pohl, A.:* Programmpakete FELD zur numerischen Berechnung stationärer Magnetfelder. ELEKTRIE, Berlin (1984) 7, S. 255–258
[9] *Pohl, A.; Götz, D.:* Numerische Berechnung magnetischer Feldkräfte. ELEKTRIE, Berlin (1984) 7, S. 258–261

EA 5755

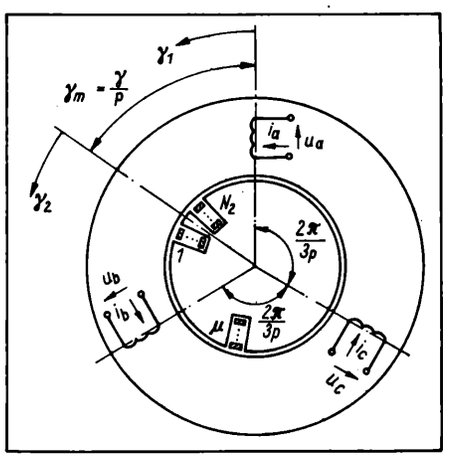
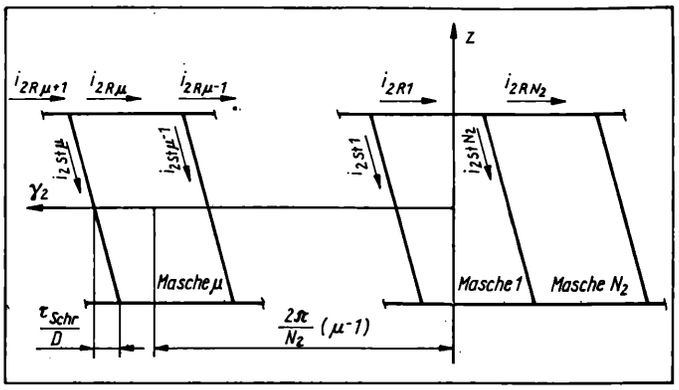
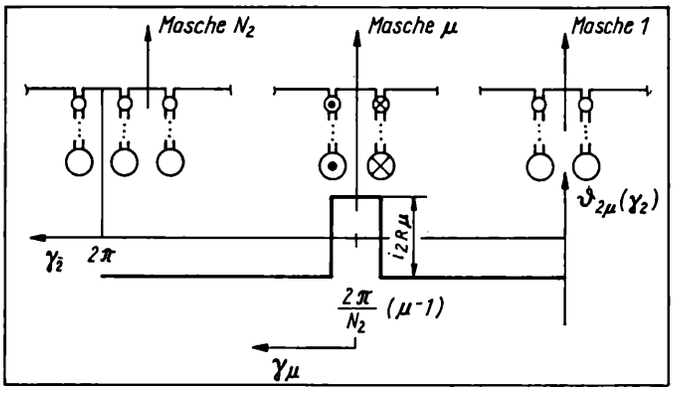


Bild 1
Ersatzbild von Ständer- und Läuferwicklung und Koordinatensysteme

Bild 2
Abwicklung der Käfigwicklung ▶

Bild 3
Durchflutungsverteilung des Stromes $i_{2R\mu}$ in der μ-ten Masche der Mehrfachkäfigwicklung ▶





1. Voraussetzungen

Die Systemgleichungen werden unter folgenden Voraussetzungen abgeleitet:

- — Wirbelstrom- und Hystereseerscheinungen im magnetischen Kreis werden vernachlässigt.
- — Der Ständer hat eine symmetrische dreisträngige Zweischichtwicklung.
- — Der Läufer hat eine aus n übereinanderliegenden Teilkäfigen aufgebaute symmetrische Mehrfachkäfigwicklung.
  Die Teilkäfige sind über gemeinsame Kurzschlußringe galvanisch miteinander verbunden.
- — Die Stäbe der Teilkäfige und die Kurzschlußringe sind stromverdrängungsfrei.
- — Die Ständer- und Läuferwicklung wird nur über die Grundwelle des Luftspaltfeldes miteinander gekoppelt.
- — Der Sättigungszustand ist konstant.
- — Die Netzspannungen sind starr.

Bild 1 zeigt das Ersatzbild der betrachteten Anordnung mit dem ständerfesten Koordinatensystem γ_1 und dem läuferfesten Koordinatensystem γ_2. Beide Koordinatensysteme sind über den Winkel γ_m miteinander verknüpft. Es gilt:

$$\gamma_1 = \gamma_2 + \gamma_m + \frac{2\,\tau_{Schr}}{L_i\,D}\,z\,. \tag{1}$$

Bei der Ableitung der Läuferspannungs-Differentialgleichungen wird der Zusammenhang zwischen Stab- und Ringströmen benötigt. Es gilt allgemein (Bild 2):

$$i_{2St\mu i} = i_{2R(\mu+1)i} - i_{2R\mu i}\,, \qquad i = 1, n\,. \tag{2}$$

Da die Stäbe der n Teilkäfige durch gemeinsame Kurzschlußringe miteinander verbunden sind, gilt für den Strom im μ-ten Ringsegment:

$$i_{2R\mu} = \sum_{i=1}^{n} i_{2R\mu i}\,. \tag{3}$$

Zur Verkürzung der Darstellung wird die Raumzeigerschreibweise in der Definition nach *Kovacs* [1] benutzt. Für den Raumzeiger der Ständerströme gilt z. B.:

$$\vec{i}_1 = i_{1\alpha} + j\,i_{1\beta} = \frac{2}{3}\,(i_{1a} + \underline{a}\,i_{1b} + \underline{a}^2\,i_{1c}) \tag{4}$$

mit $\underline{a} = e^{j\,2\pi/3}$. Analog wird ein Raumzeiger der Läuferströme definiert:

$$\vec{i}_2 = \frac{2}{N_2}\sum_{\mu=1}^{N_2} i_{2R\mu}\,e^{j\,\alpha(\mu-1)} \tag{5}$$

mit $\alpha = p\,2\,\pi/N_2$. Aus (3) folgt:

$$\vec{i}_2 = \sum_{i=1}^{n} \vec{i}_{2i}\,. \tag{6}$$

2. Durchflutungsverteilungen

Führt der Strang a der Ständerwicklung einen Strangstrom mit dem Augenblickswert i_{1a}, so gilt für die Durchflutungsverteilung des Stranges a [2]:

$$\vartheta_{1a} = \frac{4}{\pi}\,\frac{w_1}{2p}\,i_{1a}\sum_{\nu=\nu_D}^{\infty}\frac{\xi_{1\nu}}{\nu}\cos\nu\,p\,\gamma_1\,, \tag{7}$$

wobei w_1 die Strangwindungszahl, ξ_ν der Wicklungsfaktor der Ständerwicklung und

$$\nu_D = 6\,g + 1;\; g = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots \tag{8}$$

die Drehstromordnungszahlen sind. Überlagert man die drei um $2\,\pi/3\,p$ räumlich verschobenen Strangdurchflutungen und führt den Raumzeiger der Ständerströme entsprechend (4) ein, so läßt sich die Durchflutungsverteilung der symmetrischen dreisträngigen Ständerwicklung selbst wieder als Raumzeiger darstellen:

$$\vartheta_1(\gamma_1) = \vec{\vartheta}_1 + \vec{\vartheta}_1^{\,*}$$

mit

$$\vec{\vartheta}_1 = \frac{3}{2}\,\frac{w_1}{p\,\pi}\sum_{\nu=\nu_D}^{\infty}\frac{\xi_{1\nu}}{\nu}\,\vec{i}_1\,e^{-j\,\nu\,p\,\gamma_1}\,. \tag{9}$$

$\vec{\vartheta}_1^{\,*}$ bezeichnet die zu $\vec{\vartheta}_1$ konjugiert komplexe Größe.

Der Augenblickswert des in der μ-ten Masche der Mehrfachkäfigwicklung fließenden Stromes $i_{2R\mu}$ erzeugt die im Bild 3 dargestellte Durchflutungsverteilung. Eine Fourieranalyse ergibt [2]:

$$\vartheta_{2\mu} = \frac{2}{\pi}\,i_{2R\mu}\sum_{\lambda=1}^{\infty}\frac{1}{\lambda}\sin\frac{\lambda\,\pi}{N_2}\cos\lambda\,\gamma_\mu\,. \tag{10}$$

Die Durchflutungsverteilung des gesamten Käfigs setzt sich aus N_2 jeweils um $2\,\pi/N_2$ gegeneinander verschobenen Einzeldurchflutungen zusammen. Man erhält schließlich für die Läuferdurchflutungsverteilung in Raumzeigerschreibweise:

$$\vartheta_2(\gamma_2) = \sum_{\mu=1}^{N_2}\vartheta_{2\mu} = \vec{\vartheta}_2 + \vec{\vartheta}_2^{\,*}$$

mit

$$\vec{\vartheta}_2 = \frac{1}{2}\sum_{\lambda=p}^{\infty}\xi_{2\lambda}\,\vec{i}_2\,e^{-j\,\lambda\,\gamma_2}\,, \tag{11}$$

wobei

$$\xi_{2\lambda} = \frac{\sin\lambda\,\pi/N_2}{\lambda\,\frac{\pi}{N_2}} \tag{12}$$

der Läuferfaktor ist. Da nach Voraussetzung nur die Grundwelle des Ständerfeldes im Läufer induziert, sind nur folgende Läuferordnungszahlen λ möglich [3]:

$$\lambda = p + g\,N_2;\; g = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots \tag{13}$$

3. Magnetische Luftspaltfelder

Die Induktion des magnetischen Luftspaltfeldes erhält man aus der Durchflutungsverteilung über

$$b = \frac{\mu_0}{\delta_i}\,\vartheta\,. \tag{14}$$

Die Annahme eines konstanten Sättigungszustandes erlaubt die Zerlegung des Luftspaltfeldes in ein von der Ständerwicklung und in ein von der Läuferwicklung herrührendes Luftspaltfeld:

$$b_1(\gamma_1) = \vec{b}_1 + \vec{b}_1^*$$

mit dem Raumzeiger

$$\vec{b}_1 = \frac{3}{2}\frac{\mu_0}{\delta_i}\frac{w_1}{p\pi}\sum_{\nu=\nu_D}^{\infty}\frac{\xi_{1\nu}}{\nu}\vec{i}_1 e^{-j\nu p\gamma_1} \tag{15}$$

und

$$b_2(\gamma_2) = \vec{b}_2 + \vec{b}_2^*$$

mit dem Raumzeiger

$$\vec{b}_2 = \frac{1}{2}\frac{\mu_0}{\delta_i}\sum_{\lambda=p+gN_2}^{\infty}\xi_{2\lambda}\vec{i}_2 e^{-j\lambda\gamma_2}. \tag{16}$$

4. Flußverkettungen

Nach Voraussetzung tragen zur Flußverkettung eines Ständerstranges alle von der Ständerwicklung selbst hervorgerufenen Luftspaltfelder und die Grundwelle ($\lambda = p$) des von der Mehrfachkäfigwicklung erzeugten Luftspaltfeldes bei. Man erhält für den Raumzeiger der Ständerflußverkettungen:

$$\vec{\psi}_1 = \frac{2}{3}(\psi_{1a} + a\psi_{1b} + a^2\psi_{1c}), \tag{17}$$

$$\vec{\psi}_1 = (L_{h1} + L_{\sigma 1})i_1 + L_{12}i_2 e^{j\gamma} \tag{17}$$

mit

$L_{h1} = 3\frac{\mu_0}{\delta_i}\frac{Dl_i}{p^2\pi}(w_1\xi_{11})^2$ Ständerhauptinduktivität

$L_{12} = \frac{N_2}{3}\frac{\sin\alpha/2}{w_1\xi_{11}}\xi_{\mathrm{Schr}1}L_{h1}$ Gegeninduktivität von Ständer und Läufer

$\xi_{\mathrm{Schr}1} = \frac{\sin p\tau_{\mathrm{Schr}}/D}{p\tau_{\mathrm{Schr}}/D}$ Schrägungsfaktor.

Nach Voraussetzung tragen zur Flußverkettung einer Läufermasche alle von der Mehrfachkäfigwicklung selbst hervorgerufenen Felder und die Grundwelle des Ständerfeldes bei: Näherungsweise haben die μ-Masche jedes Teilkäfigs die gleiche Verkettung mit dem Luftspaltfeld. Unter Verwendung von

$$\sum_{\substack{\lambda=p+gN_2\\ g=0,\pm1,\pm2,\ldots}}^{\infty}\frac{1}{\lambda^2} = \frac{(\pi/N_2)^2}{\sin^2 p\pi/N_2}$$

erhält man für die Verkettung der μ-ten Masche des i-ten Teilkäfigs mit dem Luftspaltfeld:

$$\psi_{2\mu i} = L_{21}\frac{1}{2}\left[\vec{i}_1 e^{-j\alpha(\mu-1)}e^{-j\gamma} + \vec{i}_1^* e^{j\alpha(\mu-1)}e^{j\gamma}\right] + L_{h2}(1+\sigma_{dv2})\frac{1}{2}\left[\vec{i}_2 e^{-j\alpha(\mu-1)} + \vec{i}_2^* e^{j\alpha(\mu-1)}\right] \tag{18}$$

mit

$L_{h2} = \frac{N_2}{3}\frac{\sin^2\alpha/2}{(w_1\xi_{11})^2}L_{h1}$ Läuferhauptinduktivität

$L_{21} = \frac{3}{N_2}L_{12}$ Gegeninduktivität von Läufer und Ständer

$\sigma_{dv2} = \frac{1}{\xi_{2p}^2} - 1$

$\xi_{2p} = \frac{\sin p\pi/N_2}{p\pi/N_2}$ Läuferfaktor für die Grundwelle ($\lambda = p$).

Mit den Selbst- und Gegeninduktivitäten des Nutstreuflusses $l_{\sigma ni}$ und $m_{\sigma ni,k}$, den Selbstinduktivitäten des Zahnkopfstreuflusses $l_{\sigma zk}$ und des Ringstreuflusses $l_{\sigma R}$ erhält man für die totale Flußverkettung der μ-ten Masche des i-ten Teilkäfigs:

$$\psi_{2\mu i} = \psi_{2\mu i}' + \psi_{\sigma n\mu i} + \psi_{\sigma zk\mu} + \psi_{\sigma R\mu},$$

wobei

$$\psi_{\sigma n\mu i} = l_{\sigma ni}(i_{2\,\mathrm{St}(\mu-1)i} - i_{2\,\mathrm{St}\mu i}) + \sum_{\substack{k=1\\k\neq i}}^{n} m_{\sigma ni,k}[i_{2\,\mathrm{St}(\mu-1)k} - i_{2\,\mathrm{St}\mu k}],$$

$$\psi_{\sigma zk\mu} = l_{\sigma zk}(i_{2\,\mathrm{St}(\mu-1)} - i_{2\,\mathrm{St}\mu}),$$

$$\psi_{\sigma R\mu} = \frac{2}{N_2}l_{\sigma R}i_{2R\mu}. \tag{19}$$

Analog zu (5) lassen sich die Flußverkettungen der N_2 Läufermaschen zusammenfassen:

$$\vec{\psi}_{2i} = \frac{2}{N_2}\sum_{\mu=1}^{N_2}\psi_{2\mu i}e^{j\alpha(\mu-1)}, \tag{20}$$

wobei

$$\vec{\psi}_{2i} = \psi_2' + \vec{\psi}_{\sigma ni} + \vec{\psi}_{\sigma zk} + \vec{\psi}_{\sigma R}.$$

Unter Berücksichtigung von

$$\sum_{\mu=1}^{N_2}e^{j2\pi/N_2(\mu-1)} = 0$$

und

$$\frac{2}{N_2}\sum_{\mu=1}^{N_2}[-i_{2R(\mu-1)i} + 2i_{2R\mu i} - i_{2R(\mu+1)i}]e^{j\alpha(\mu-1)} = \left[2\sin\frac{\alpha}{2}\right]^2\vec{i}_{2i}$$

erhält man für die Raumzeiger der Streuflußverkettungen

$$\vec{\psi}_{\sigma ni} = L_{\sigma ni}\vec{i}_{2i} + \sum_{\substack{k=1\\k\neq i}}^{n}M_{\sigma nik}\vec{i}_{2k},$$

$$\vec{\psi}_{\sigma zk} = L_{\sigma zk}\vec{i}_2 \quad \vec{\psi}_{2R} = L_{\sigma R}\vec{i}_2 \tag{21}$$

und für die Raumzeiger der totalen Flußverkettungen des i-ten Teilkäfigs

$$\vec{\psi}_{2i} = L_{21}\vec{i}_1 e^{-j\gamma} + L_2\vec{i}_2 + L_{\sigma ni}\vec{i}_{2i} + \sum_{\substack{k=1\\k\neq i}}^{n}M_{\sigma nik}\vec{i}_{2k}, \tag{22}$$

wobei

$$L_2 = L_{\sigma zk} + L_{\sigma R} + (1+\sigma_{dv2})L_{h2} \tag{23}$$

$$L_{\sigma ni} = \left[2\sin\frac{\alpha}{2}\right]^2 l_{\sigma ni} \quad M_{\sigma nik} = \left[2\sin\frac{\alpha}{2}\right]^2 m_{\sigma nik} \tag{24}$$

$$L_{\sigma zk} = \left[2\sin\frac{\alpha}{2}\right]^2 l_{\sigma zk} \quad L_{\sigma R} = \frac{2}{N_2}l_{\sigma R}$$

sind.

5. Spannungsdifferentialgleichungen

Für die symmetrische, dreisträngige Ständerwicklung lautet die Spannungsdifferentialgleichung in Raumzeigerdarstellung:

$$\vec{u}_1 = \frac{d\vec{\psi}_1}{dt} + R_1\vec{i}_1. \tag{25}$$

Mit dem Stabwiderstand des i-ten Teilkäfigs $r_{\mathrm{St}i}$ und dem Widerstand eines Kurzschlußringes r_R erhält man für die Spannungsdifferentialgleichung der μ-ten Masche des i-ten Teilkäfigs:

$$r_{\mathrm{St}i}[i_{2\,\mathrm{St}(\mu-1)i} - i_{2\,\mathrm{St}\mu i}] + \frac{2}{N_2}r_R i_{2R\mu} + \frac{d\psi_{2\mu i}}{dt} = 0. \tag{26}$$

Werden alle μ Maschengleichungen des i-ten Teilkäfigs aufsummiert, erhält man als Spannungsdifferentialgleichung des i-ten Teilkäfigs in Raumzeigerdarstellung:

$$\frac{d\vec{\psi}_{2i}}{dt} = -R_{\mathrm{St}i}\vec{i}_{2i} - R_R\vec{i}_2, \tag{27}$$

wobei

$$R_{\mathrm{St}i} = \left[2\sin\frac{\alpha}{2}\right]^2 r_{\mathrm{St}i} \quad R_R = \frac{2}{N_2}r_R. \tag{28}$$

6. Elektromagnetisch entwickeltes Drehmoment

Für das elektromagnetisch entwickelte Drehmoment ergibt sich wie beim Einfachkäfigläufer:

$$m = -\frac{3}{2}pL_{12}\,\mathrm{Im}\left[\vec{i}_1^*\vec{i}_2 e^{j\gamma}\right]. \tag{29}$$

Das dynamische Grundgesetz beschreibt in Form einer oder mehrerer Differentialgleichungen die Wirkung des elektromagnetisch entwickelten Drehmomentes auf das mechanische System. Im einfachsten Fall bei starrem mechanischem Verband gilt:

$$m = m_w + J\frac{d\omega_m}{dt}. \tag{30}$$

m_w Widerstandsmoment.

7. Systemgleichungen

Die Gln. (17), (22), (25), (27), (29) und (30) beschreiben in ihrer Gesamtheit das dynamische Verhalten des Asynchronmotors mit Stromverdrängungsläufer. Im Sinne einer einheitlichen Darstellung ist es vorteilhaft, die Ständer- und Läuferströme, -spannungen und -flußverkettungen in einem gemeinsamen Koordinatensystem darzustellen, das im allgemeinen mit der (elektrischen) Winkelgeschwindigkeit ω_k rotiert. Mit den Transformationsbeziehungen

$$\vec{g}_1 := \vec{g}_1 \, e^{-j\gamma_k} \quad \text{und} \quad \vec{g}_2 := \vec{g}_2 \, e^{j(\gamma - \gamma_k)}, \tag{31}$$

wobei

$$\omega = \frac{d\gamma}{dt} \quad \text{und} \quad \omega_k = \frac{d\gamma_k}{dt}$$

gilt, lauten die Systemgleichungen des Asynchronmotors mit Stromverdrängungsläufer im mit der Winkelgeschwindigkeit ω_k rotierenden Koordinatensystem:

$$\frac{d\vec{\psi}_1}{dt} = -j\,\omega_k \vec{\psi}_1 + \vec{u}_1 - R_1 \vec{i}_1,$$

$$\frac{d\vec{\psi}_{2i}}{dt} = -j\,(\omega_k - \omega)\,\vec{\psi}_{2i} - R_{Sti}\,\vec{i}_{2i} - R_R \vec{i}_2, \tag{32}$$

$$\vec{\psi}_1 = (L_{h1} + L_{\sigma 1})\,\vec{i}_1 + L_{12}\,\vec{i}_2,$$

$$\vec{\psi}_{2i} = L_{21}\,\vec{i}_1 + L_2\,\vec{i}_2 + L_{\sigma ni}\,\vec{i}_{2i} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n} M_{\sigma nik}\,\vec{i}_{2k},$$

$$m = -\frac{3}{2}\,p\,L_{12}\,\mathrm{Im}\left[\vec{i}_1^{\,*}\,\vec{i}_2\right],$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J}\,(m - m_w).$$

Die Winkelgeschwindigkeit des Bezugssystems ω_k kann frei gewählt werden und hängt von der Problemstellung ab.
Zur Integration der Systemgleichungen ist es nötig, die in ihnen enthaltenen komplexen Raumzeiger in ihre Real- und Imaginärteile zu zerlegen. Es gilt allgemein:

$$\vec{g} = g_r + j\,g_i. \tag{33}$$

Auf die Anschrift des Gleichungssystems nach Trennung in Real- und Imaginärteil wird hier verzichtet.
Die Systemgleichungen der Asynchronmotoren mit Einfachkäfigläufer und mit Doppelkäfigläufer erhält man als Sonderfälle $n = 1$ und $n = 2$ aus denen des Mehrfachkäfigläufers. Beim Asynchronmotor mit Hochstabläufer wird die sich über die Stabhöhe tatsächlich einstellende Stromdichteverteilung durch eine Treppenkurve angenähert. Dieser näherungsweisen Erfassung der Stromverdrängungserscheinung entspricht die Aufteilung des Hochstabes in n übereinanderliegende stromverdrängungsfreie Teilstäbe.

8. Nutstreuinduktivitäten des unterteilten Nutenleiters

Unter den Voraussetzungen, daß

- die magnetische Feldstärke nur eine senkrecht zur Nutmittellinie verlaufende Komponente hat
- die magnetische Spannung im Eisen vernachlässigt werden kann und
- das Leitermaterial die Nut in ihrer gesamten Breite füllt,

erhält man für die Selbst- und Gegeninduktivitäten des Nutstreuflusses des in Bild 4 dargestellten unterteilten Nutenleiters:

$$l_{\sigma ni} = \mu_0 l_{Fe}\left[\frac{a}{s} + \frac{1}{3}\frac{h_i}{b_i} + \sum_{j=i+1}^{n}\frac{h_j}{b_j}\right]$$

$$m_{\sigma nki} = \mu_0 l_{Fe}\left[\frac{a}{s} + \frac{1}{2}\frac{h_i}{b_i} + \sum_{j=i+1}^{n}\frac{h_j}{b_j}\right] \tag{34}$$

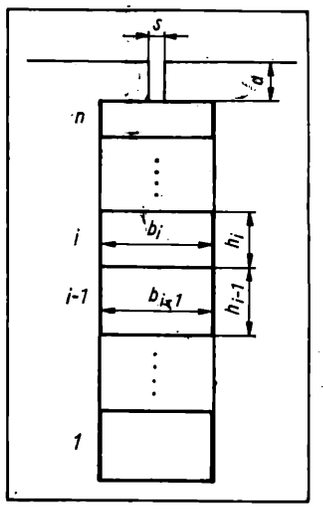
für $k < i$

$$m_{\sigma nik} = m_{\sigma nki}.$$

9. Zusammenfassung

Es wird das mathematische Modell eines Asynchronmotors mit einer Mehrfachkäfigwicklung im Läufer entwickelt. Mit diesem Modell können die Stromverdrängungserscheinungen auch im dynamischen Betrieb bei schnellen Drehzahländerungen berechnet werden.

Bild 4
Unterteilter Nutenleiter



Die Theorie beschränkt sich auf die Grundwelle der Luftspaltfelder. Die Einführung von Raumzeigern für Spannungen, Ströme und Flußverkettungen ergibt eine mathematisch übersichtliche und physikalisch anschauliche Darstellung.

Literatur

[1] *Kovacs, K. P.; Racz, I.:* Transiente Vorgänge in Wechselstrommaschinen. Budapest: Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften 1959
[2] *Müller, G.:* Elektrische Maschinen. Betriebsverhalten rotierender elektrischer Maschinen. Berlin: VEB Verlag Technik 1985
[3] *Taegen, F.; Hommes, E.:* Das allgemeine Gleichungssystem des Käfigläufermotors unter Berücksichtigung der Oberfelder. Archiv für Elektrotechnik 55 (1972) 1, S. 21–31 und 2, S. 98–105

EA 5886

Anwendungsgebiete der Hochtemperatur-Supraleitung

Für die Anwendung der neuen Hochtemperatur-Supraleitung (HTSL) auf oxidkeramischer Basis werden gegenwärtig Möglichkeiten und teilweise noch recht spektakuläre Projekte diskutiert. Eine Auswahl davon wird nachfolgend aufgeführt.

- Supraleiter verdrängen äußere magnetische Felder und eignen sich gut für Abschirmzwecke
- supraleitende Squids reagieren auf schwächste magnetische Signale und werden zur Untersuchung der elektrischen Aktivität von Herz und Hirn eingesetzt
- durch Beschuß mit elektrisch geladenen Teilchen — sog. Ionenimplantation — sollen dünne HTSL-Schichten zum Halbleiter werden; das ist die Voraussetzung zur Massenfertigung hochintegrierter supraleitender Chips
- HTSL in sog. Josephson-Kontakten angewandt, könnte sehr schnelle Schalter ergeben und die Entwicklung von Computern ermöglichen, die schneller arbeiten als konventionelle Rechner; mit HTSL verdrahtete Computer wären vorteilhaft, weil sie weniger Energie verlieren als die jetzigen Kupferdrähte
- supraleitende Magnetbänder können Informationen äußerst dicht speichern
- mit HTSL betriebene Magnete in magnetohydrodynamischen Generatoren angewandt, könnten dieser Technik zum Durchbruch verhelfen
- verlustlose Supraleiter ersparen Verluste auf Übertragungsstrecken
- Supraleiter ermöglichen auch die Übertragung sehr hochfrequenter Wechselspannungen bis zu 10 THz (Bereich infraroter Wärmestrahlung!).

Weitere Anwendungen liegen auf den Gebieten der Energiespeicherung, der Nachrichtenübertragung, der medizinischen Diagnoseverfahren, in der Montantechnik zur magnetischen Erzaufbereitung, in der Schiffsantriebstechnik und bei Schwebebahnen. (ADN/EL)

EA 2819

Isolationsprüfgerät für Hochspannungswicklungen elektrischer Maschinen

R. Porzel; K.-H. Linsel; KDT, Ilmenau

1. Zielstellung

Zur Beurteilung wesentlicher Qualitätsparameter von Isolierungen der Wicklung rotierender elektrischer Maschinen sollte ein Prüfgerät entwickelt werden, das in der Produktion, bei Revisionen und im Labor ein Meßverfahren realisiert, mit dem ein Höchstmaß an Zustandsinformationen aus der Isolierung gewonnen werden kann. Insbesondere sollen bei der Prüfung Hochspannungsspulen mit fehlerbehafteter Isolierung ausgesondert und die Fehler bewertet werden können.

2. Prüfgerät und seine Baugruppen

Ausgehend von den in [1] vorgestellten Ergebnissen wurde in Zusammenarbeit zwischen der Technischen Hochschule Ilmenau, Sektion Elektrotechnik, und dem VEB Elektromaschinenbau Dresden, Stammbetrieb des VEB Kombinat Elektromaschinenbau, Sachsenwerk, ein Prüfgerät entworfen, aufgebaut und erprobt. Der Aufbau des Gerätes ist im Bild 1 dargestellt. Es besteht aus zwei selbständigen Einheiten: einem Leistungsteil und einem Informationsteil. Beide Einheiten sind so ausgelegt, daß der Leistungsteil mit beliebigen Geräten zur Auswertung der abklingenden Schwingung, z. B. einem Elektronenstrahloszilloskop, betrieben und der Informationsteil mit einem beliebigen Leistungsteil anderer Konstruktionen gekoppelt werden kann.

Der Hauptbestandteil des Leistungsteils ist eine modifizierte Impulsspannungsprüfanlage HS, die durch einen Niederspannungsteil NS versorgt wird. Der Informationsteil IT dient sowohl der Steuerung der Prüflingsbelastung hinsichtlich der Anzahl der Spannungsimpulse als auch zur Erfassung und Verarbeitung der Meßgröße als Antwort des Prüflings auf die vorhergehende Spannungsbelastung. Zur Entlastung der Hauptisolierung wird die Ausgangshochspannung dem Prüfobjekt symmetrisch zugeführt.

Für Sonderprüfzwecke ist eine unsymmetrische Prüflingsbelastung einstellbar.

Die Impulsfolgefrequenz der Spannungsbelastungen läßt sich von 1 bis 12,5 Hz einstellen. Einzelimpulse sind möglich. Die Frequenz der Prüfspannung beträgt je nach Prüfobjekt 10 bis 200 kHz. Durch die Steuerelektronik wird ein Hochspannungsschalter betätigt, der den Prüfling mit vorgegebener Spannungshöhe impulsförmig belastet. Die abklingende Kosinusschwingung wird mit Hilfe eines elektronischen Spannungs-Zeit-Fensters auf ihre Dämpfungseigenschaften ausgewertet und das Ergebnis anhand vorgegebener Kriterien an einer Digitalanzeige dargestellt und als „Gut"- „Schlecht"-Entscheidung angezeigt.

2.1. Leistungsteil

Über eine Gleichstrom-Hochspannungsprüfanlage, bestehend aus Niederspannungsteil NS, Hochspannungsprüftransformator HTr, Hochspannungsgleichrichter V1, V2 und den notwendigen Ladewiderständen R_L, werden zwei symmetrisch angeordnete Speicher-Kondensatoren C_S aufgeladen (Bild 2). Ein Hochspannungstriggerimpuls beeinflußt das elektrostatische Feld einer Dreielektroden-Schaltfunkenstrecke SFS so, daß sie bereits bei Feldstärken durchschlägt, die kleiner sind als die statische Durchschlagfeldstärke, die durch die Ladespannung U_L der Kondensatoren C_S und die Funkenstreckengeometrie bestimmt wird. Die Entladung der Kondensatoren über Prüfobjekt und Schaltfunkenstrecke bewirkt eine steile Spannungsbeanspruchung der Isolierung des Prüflings. Nach dem Einschalten schwingt der Schwingkreis, bestehend aus der Induktivität der geprüften Hochspannungsspule, der Kapazität der Impulskondensatoren und dem Widerstand der Funkenstrecke

Doz. Dr.-Ing. *Richard Porzel* ist Mitarbeiter im Wissenschaftsbereich Elektrische Isolier- und Hochspannungstechnik; Prof. Dr.-Ing. *Karl-Heinz Linsel* ist Leiter des Wissenschaftsbereiches Elektrische Maschinen an der TH Ilmenau.

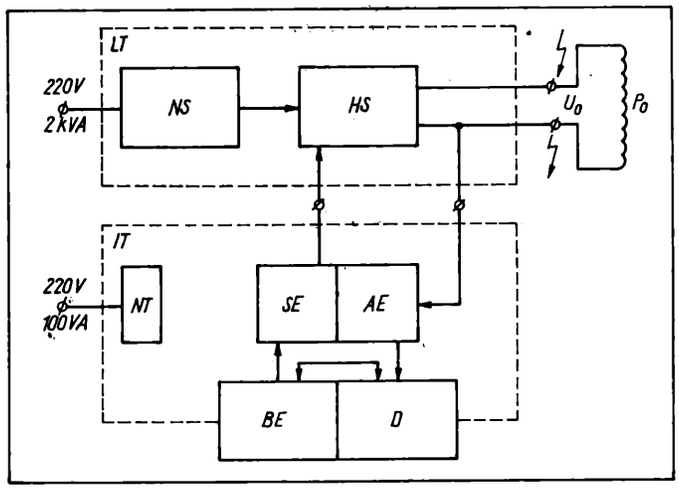


Bild 1. Blockschaltbild der Prüfanlage

LT Leistungsteil des Prüfgerätes; IT Informationsteil des Prüfgerätes; NS Niederspannungsteil mit Stromversorgung; HS Gleichstromprüfanlage mit Speicherkondensatoren und Hochspannungsschalter; PO Prüfling; SE Steuerelektronik für Spannungsstöße; AE Auswerteelektronik für Prüflingssignale; BE Bedieneinheit für Programmierung, Prüfablauf und Prüfkriterien; D Digitale Meßwertanzeige und Anzeige für Prüfkriterium; NT Netzteil für Informationseinheit

und dem Realteil der Prüflingsimpedanz Re ($\underline{Z}_p$), mit einer abklingenden Kosinusschwingung nach Bild 3 aus [1].

Der Vorteil der beschriebenen Schaltung der Hochspannungsanlage im Vergleich zu bekannten Schaltungen besteht in der wartungsarmen, gut steuerbaren Doppelfunkenstrecke, die einen reproduzierbaren, stabilen Prüfbetrieb auch bei Langzeituntersuchungen ermöglicht [2] bis [5].

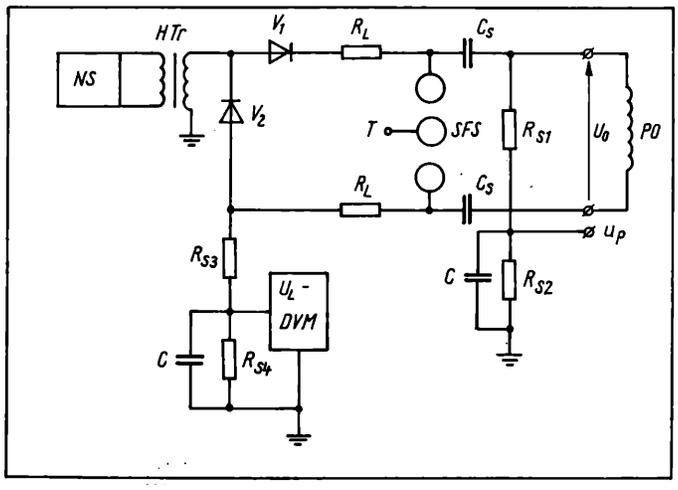
Der Leistungsteil kann im symmetrischen Betrieb Prüfspannungen von 2 × (0 bis 30) kV und im unsymmetrischen Betrieb von 24 kV erzeugen.

2.2. Informationsteil

Die Ladespannung der Kondensatoren als Maß für die Belastung des Prüfobjektes wird mit einem Digitalvoltmeter DVM gemessen. Die abklingende Kosinusschwingung kann über einen Spannungsteiler als Meßspannung $up\ (t)$ mit einem Elektronenstrahloszilloskop beobachtet und ausgewertet werden. Zur Vermeidung von Auswertefehlern und Routinearbeit bei Serienmessungen wird die vom Dämpfungsfaktor δ abgeleitete Größe „Zahl der Fensterdurchgänge" n gewählt. Sie gibt die Anzahl der Halbschwingungen an, die eine vorgegebene Spannungsschwelle überschreitet [1]. Der Informationsteil (Bild 4) wertet die in der Spannung $up\ (t)$ enthaltene

Bild 2. Schaltung des Leistungsteils des Prüfgerätes

NS Niederspannungsteil mit Stromversorgung; HTr Hochspannungsprüftransformator; V1, V2 Hochspannungsgleichrichter; R_L Ladewiderstände; C_S Speicherkondensatoren; SFS Dreielektroden-Schaltfunkenstrecke; R_{S1}, R_{S2} Spannungsteiler für Prüflingsspannung; R_{S3}, R_{S4} Spannungsteiler für Ladespannung; C_P Parallelkapazität zum Niederspannungswiderstand; U_L-DVM Digitalvoltmeter für Ladespannung; $U_{P\,max}$ Meßspannung. Ausgang für Informationsteil; PO Prüfobjekt, Hochspannungsspule; Tr Triggereingang vom Informationsteil



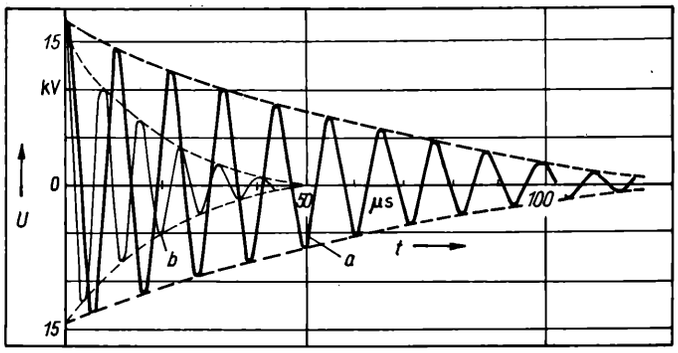


Bild 3. $u\ (t)$-Oszillogramm einer abklingenden Schwingung im
a) fehlerfreien Fall; b) Fehlerfall
(Spulen in Luft)

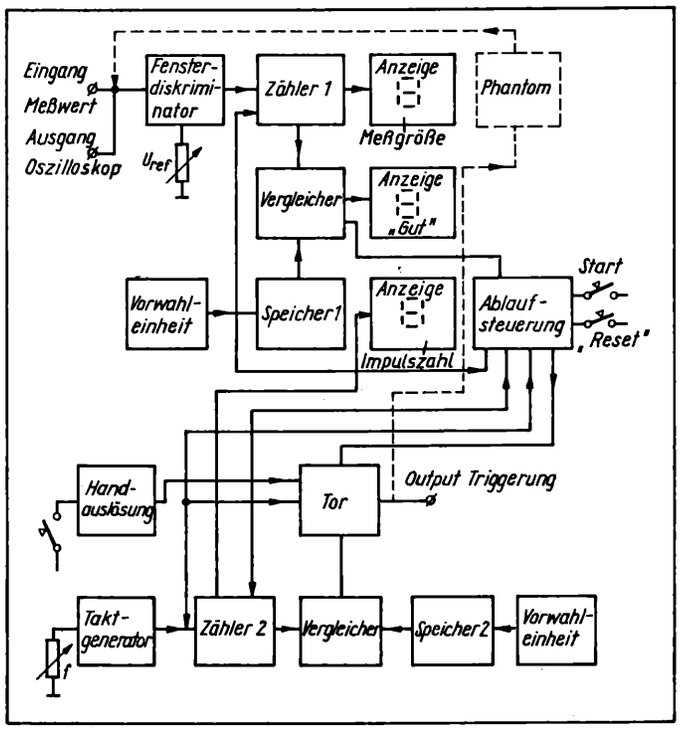
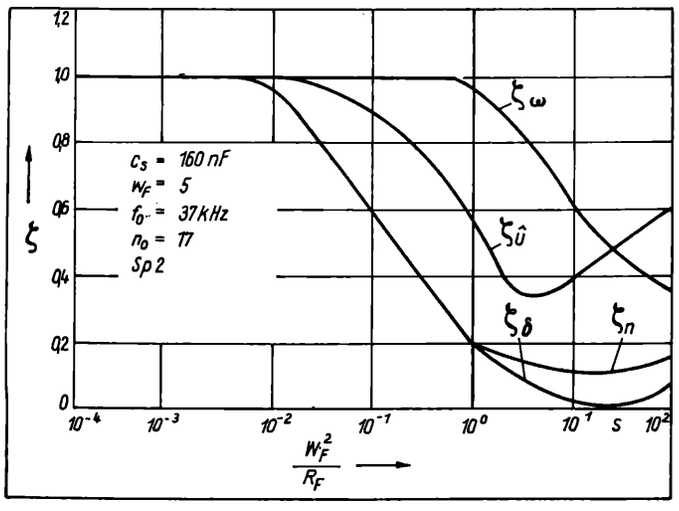


Bild 4. Blockschaltbild des elektronischen Auswerte- und Steuerteils

Bild 5. Bewertungsquotienten ζ in Abhängigkeit vom Fehlerparameter w_F^2/R_F



Information „Dämpfungsfaktor δ" aus und stellt den Meßwert „Anzahl der Fensterdurchgänge n" bereit. Außerdem werden in ihm Triggerimpulse für den Leistungsteil erzeugt.
Über eine Bedieneinheit wird ein Zähler Z 2 auf die Anzahl der Prüfimpulse vorprogrammiert. Bei Start des Prüfprogramms gibt dieser Zähler mit eingestelltem Impulsabstand die vorgegebene Anzahl von Steuerimpulsen an die Steuerelektronik. In ihr wird über Optokoppler, Verstärkerstufen und Triggerstufe mit Thyristor ein Hochspannungsimpuls über einen Impulstransformator erzeugt, der die Funkenstrecke im Hochspannungsteil triggert. Die Prüfsignalantwort gelangt auf einen mit einstellbaren Schwellen ausgestatteten Fensterdiskriminator, der entsprechend der Anzahl der Fensterdurchgänge Rechteckimpulse für die Zählerbaugruppe (1) bereitstellt. Sie zählt diese Impulse und zeigt den Meßwert decodiert und zweistellig an. Der Grenzmeßwert wird über die Vorwahleinheit in Speicher 1 eingegeben und nach Ablauf eines Meßvorgangs mit dem Istmeßwert verglichen. Das Ergebnis wird digital als „Gut"-„Schlecht"-Anzeige ausgegeben.
Für die Triggerung des Leistungsteils stellt ein Taktgenerator einen Takt mit 1 bis 30 Impulse/min zur Verfügung. Diese Impulse gelangen nach Freigabe des Tores durch die Ablaufsteuerung auf den Triggerausgang des Anzeigeteils. Eine aus Zähler 2, Vergleicher und Speicher 2 bestehende Logik sperrt nach Ablauf der im Speicher 2 vorgegebenen, frei wählbaren dreistelligen Prüfimpulszahl das Tor wieder. Für Einstellzwecke ist zusätzlich eine Auslösung von Einzelimpulsen mit manueller Triggerung möglich. Eine Ablaufsteuerung sorgt für das automatische Rücksetzen und Laden der Zählereinheiten. Bei Betätigen der Taste VE werden statt der aktuellen Werte für Prüfimpulszahl und Meßwert die Vorwahlgrößen zur Anzeige gebracht und können dann über die Tasten A bis E beeinflußt werden. Der Teil „Anzeigeeinheit" besteht außer den Baugruppen Netzteil und Netzfilter aus 5 Leiterkarten „Zähler", 1 Kassette (EGS 60 mm) mit Eingangsverstärker, manueller Triggerung und Phantom sowie den Leiterkarten „Anzeigeeinheit und Vergleicher". Die Leiterkarten „Zähler" enthalten Zähler, Decoder und Speicher für je 1 Anzeigestelle. Die Funktionseinheit „Phantom" erzeugt intern für Testzwecke ein simuliertes Meßsignal, mit dem die ordnungsgemäße Funktion der Baugruppen geprüft werden kann. Ein Ausgang für Elektronenstrahloszilloskope ermöglicht eine visuelle Kontrolle des Meßsignals.

3. Gerätetest und Meßergebnisse

Das Gerätesystem wurde mit Modellspulen verschiedener Fehlerparameter und Originalspulen verschiedener Größe, Bauart und Induktivität im symmetrischen und unsymmetrischen Betrieb getestet [5] [6] [7].
Zur Kennzeichnung der Empfindlichkeit des Prüfverfahrens wurden mögliche Meßwerte δ, n, ω und $\hat{u}$ [1. Amplitude von $u\ (t)$] verglichen. Dazu wurden die Bewertungsquotienten

$$\zeta_\delta = \frac{\delta_0}{\delta_F}, \tag{1}$$

$$\zeta_n = \frac{n_F}{n_0}, \tag{2}$$

$$\zeta_\omega = \frac{\omega_0}{\omega_F}, \tag{3}$$

$$\zeta_{\hat{u}} = \frac{\hat{U}_F}{\hat{U}_0}, \tag{4}$$

aus den Meßwerten im fehlerfreien Fall (Index 0) und Fehlerfall (Index F) errechnet und für die Modellspule im Bild 5 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, daß die Quotienten ζ_δ und ζ_n, die auf der Auswertung des Dämpfungsfaktors basieren, bei Fehlerparametern W_F^2/R_F von 1 um eine Größenordnung geringer sind als bei den Quotienten ζ_ω und $\zeta_{\hat{u}}$. Damit sind die theoretischen Ergebnisse aus [1] experimentell nachgewiesen.
Ein Spannungssteigerungsversuch wurde an einer Spule durchgeführt. Für die Anzahl der Fensterdurchgänge ergibt sich [1]

$$n = 1 + \frac{2f}{\delta} \ln \frac{U_{P\,max}}{U_G}, \tag{5}$$

f Frequenz der Schwingung, δ Dämpfungsfaktor, $U_{P\,max}$ Maximalwert von $u\ (t)$, U_G Diskriminator-Schwellenspannung des Informationsteils (Fensterspannung).
Für eine fehlerfreie Spule ist bei eingestellter Schwellenspannung U_G

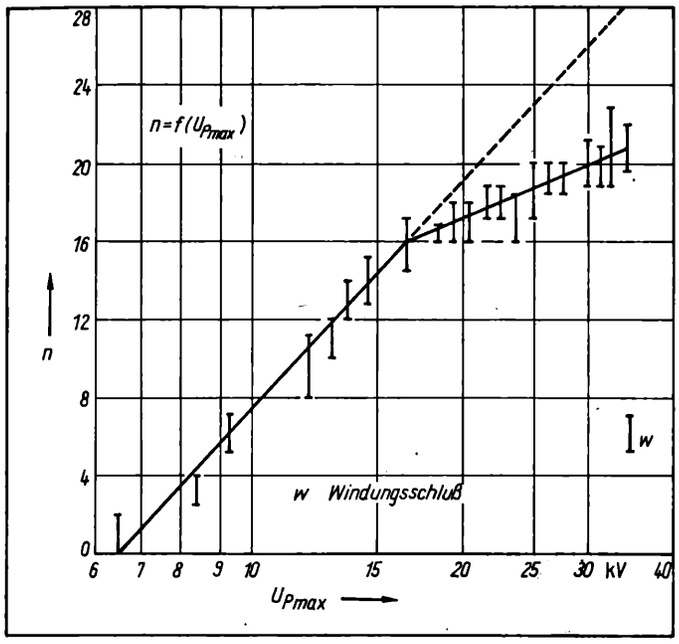


Bild 6. Spannungssteigerungsversuch

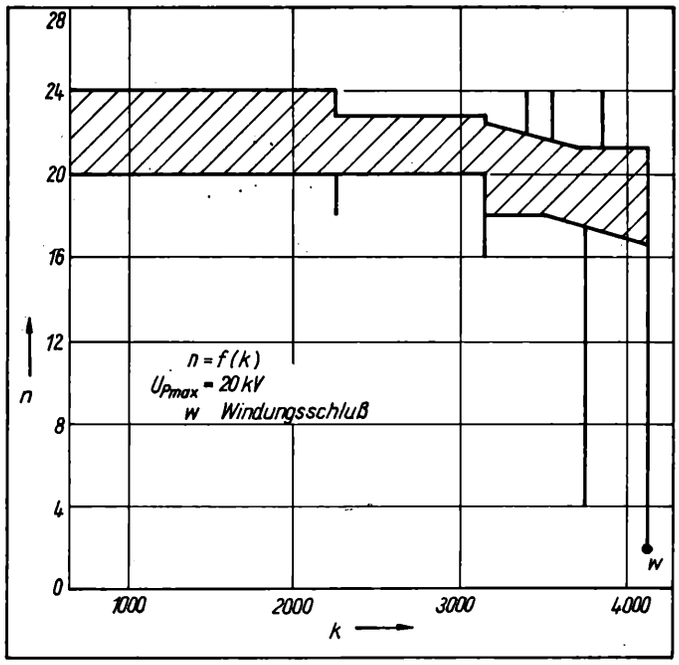


Bild 7. Konstantspannungsversuch, k Anzahl der Belastungen

die Anzahl n von $U_{P\,max}$ abhängig. Darin stellt $n = f\,(U_{P\,max})$ im einfach logarithmischen System eine Gerade dar. Ihr Anstieg verringert sich, wenn der Dämpfungsfaktor wächst. Bei der Prüfung einer Spule mit 100 Spannungsbelastungen je Spannungsstufe steigt die Anzahl der Fensterdurchgänge entsprechend (5) bis $U_{P\,max} = 17$ kV an (Bild 6). Oberhalb dieser Spannung wächst n mit vermindertem Anstieg. Das ist auf einen erhöhten Dämpfungsfaktor zurückzuführen. Der Windungsschluß tritt bei $U_{P\,max} = 35$ kV ein. Im Bereich $17\text{ kV} < U_{P\,max} < 35\text{ kV}$ erhöhen Entladungserscheinungen in der Längsisolierung den Dämpfungsfaktor. Im Konstantspannungsversuch wurde ein Prüfobjekt gleichen Typs mit einer konstanten Spannung $U_{P\,max}$ bei einer definierten Triggerfrequenz bis zum Windungsschluß belastet. Die Anzahl der Fensterdurchgänge als Funktion der Anzahl der Belastungen k zeigt Bild 7. Die Anzahl der dabei erfolgten Belastungen k ist ein Maß für die Lebensdauer der Längsisolierung bei dem jeweiligen Wert $U_{P\,max}$. Wegen des stochastischen Charakters der Entladungserscheinungen ergibt sich ein Streubereich für n. Hinzu kommt der Fehler durch die digitale Auswertung von $\pm$ 1 Digit.

Bei $U_{P\,max} = 20$ kV stellt sich zu Beginn des Konstantspannungsversuchs die Anzahl der Fensterdurchgänge je Belastung zwischen 20 und 24 ein (Bild 7). Nach einer großen Anzahl von Belastungen sinkt der Mittelwert der Anzahl der Fensterdurchgänge, und es treten einzelne starke Senkungen dieser Anzahl auf, die auf nichtstabile, stärkere Entladungen zurückzuführen sind. Ihnen folgen etwa vorherige Werte. Nach der 4050. Belastung werden 2 Fensterdurchgänge als Ausdruck eines Windungsschlusses angezeigt.

Der Leistungsteil und die elektronische Steuer- und Auswerteeinrichtung haben sich in zahlreichen Tests mit Modellen von Maschinenisolierungen und Originalspulen in Spannungssteigerungsversuchen und Konstantspannungsversuchen über einige Millionen Spannungsimpulse außerordentlich bewährt [5] [6]. Der Abbrand der Triggerfunkenstrecken ist bei Speicherkapazitäten von 10 bis 160 nF vernachlässigbar. Die elektromagnetische Verträglichkeit von Elektronikteil und Leistungsteil ist gegeben.

4. Zusammenfassung

Zur Nutzung eines empfindlichen Windungsschlußprüfverfahrens wurde ein Gerätesystem entwickelt und erprobt. Die einzelnen Baugruppen des Systems und ihr Zusammenwirken werden beschrieben. Die mikroelektronische Steuerung und Meßwertverarbeitung ermöglichen eine hohe Empfindlichkeit bei der Windungsschlußerfassung und eine hohe Effektivität bei der Nutzung des Gerätesystems in der Produktions- und Laborprüftechnik.

Zum Nachweis der Eignung des Prüfverfahrens, der Funktionstüchtigkeit der gerätetechnischen Lösung werden Meßergebnisse vorgestellt, die an Spulen im Spannungssteigerungs- und Konstantspannungsversuch gewonnen wurden.

Literatur

[1] *Linsel, K.-H.; Porzel, R.:* Diagnose von Isolierungsfehlern in Wicklungen elektrischer Maschinen. ELEKTRIE, Berlin (in Vorbereitung)

[2] Windungsisolationsprüfgerät „Reihe WP." ASEA-HAEFELY-MICAFIL 1980

[3] *Oliver, J. A.:* A turn insolation test for stator coils. IEEE Trans. PAS (1968) 3, S. 669–676

[4] *Simons, J. S.:* Diagnostische Prüfung der Isolierungen von Hochspannungsmaschinen. IEE Proceedings, Pt B (1980) 3, S. 139–154

[5] *Flögel, A.:* Schwachstellenerfassung in verteilten Wicklungen. Diplomarbeit. TH Ilmenau, Sektion Elektrotechnik, 1984

[6] *Fahrig, E.:* Anwendung des Isolationsprüfgerätes. Großer Beleg. TH Ilmenau, Sektion ET, 1985

[7] *Fahrig, E.:* Untersuchung von Hochspannungsisolierungen elektrischer Maschinen mit dem Windungsschlußprüfgerät WPG. Diplomarbeit. TH Ilmenau, Sektion Elektrotechnik, 1986

EA 5850

Legierung für supraleitende Magnetspulen

Eine in Japan entwickelte neuartige Legierung, die als schmales, 5 mm breites Band in Form einer amorphen Legierung hergestellt wird, läßt sich mit mehr als 15000 A belasten. Dadurch können Magnetfelder mit 30 bis 32 Tesla erzeugt werden. Japanische Physiker wollen damit versuchen, einen Fusionsreaktor zu betreiben. Die Legierung besteht aus dreiwertigem Niob in einer nicht bekanntgegebenen Mischung mit Aluminium und Germanium. Es ist nicht angegeben, wie das 5 mm × 0,15 mm dicke Metallband zu Kabeln verarbeitet wird, die, mit flüssigem Helium gekühlt, supraleitend werden. Die Legierung soll sich nur unter Verwendung von Elektronenstrahlen schmelzen lassen. (ADN/EL)

EA 2815

Neue Hochtemperatur-Supraleiter in der Diskussion

Als Ergebnis einer Diskussionsveranstaltung von Fachleuten der Supraleitungstechnik der BRD zeichnen sich folgende Schwerpunkte für zukünftige Fördermaßnahmen ab:

— Synthese neuer Supraleiter
— Präparation und Charakterisierung von chemisch stabilem Massivmaterial und dünnen Schichten
— Untersuchungen zum besseren Verständnis des Mechanismus der Hochtemperatur-Supraleitung
— Arbeiten zur Formgebung und zur Mikrostrukturierung
— Verbesserung der spezifischen Eigenschaften von Supraleitern im Hinblick auf technische Anwendungen. (ADN/EL)

EA 2814

Ermittlung der Parameter der Drehstrom-Asynchronmaschine vorwiegend aus den Typenschildangaben

H. König, KDT, Karl-Marx-Stadt

Herrn Prof. Dr. sc. techn. *Peter-Klaus Budig* zum 60. Geburtstag gewidmet

Die Beschreibung des dynamischen Verhaltens der Asynchronmaschine hat für den Entwurf und die Steuerung von automatisierten Antrieben grundlegende Bedeutung. Da die dafür notwendigen Maschinenparameter nicht Bestandteil der Prospektangaben sind, werden sie im allgemeinen experimentell bestimmt. Dabei ist die Ermittlung der Streuziffer und der Rotorzeitkonstante mit großem Aufwand verbunden. Das vorgestellte Verfahren zielt darauf ab, ausgehend von den einfach bestimmbaren Ständerparametern nur unter Verwendung der Typenschildangaben die Parameter des dynamischen Betriebes zu berechnen.

1. Theoretische Grundlagen

Ausgangspunkt ist die Ständerspannungsgleichung der Asynchronmaschine in rotorflußsynchronen Koordinaten:

$$\underline{u}_S = R_S \underline{i}_S + \frac{d \underline{\psi}_S}{dt} + j \omega_K \underline{\psi}_S, \tag{1}$$

mit

$$\underline{\psi}_S = L_H / L_R \underline{\psi}_R + \sigma L_S \underline{i}_S. \tag{2}$$

Der Ständerstrom setzt sich aus fluß- und momentanbildender Komponente zusammen, deren Zusammenhang aus der Rotorspannungsgleichung folgt. Nach Definition eines rotorbezogenen Magnetisierungsstromes

$$\underline{\psi}_R = L_H \underline{i}_{\mu R} \tag{3}$$

ergibt sich

$$\underline{i}_S = T_R \frac{d \underline{i}_{\mu R}}{dt} + [1 + j (\omega_{\mu R} - \omega) \cdot T_R] \underline{i}_{\mu R}. \tag{4}$$

Bei Betrachtung des stationären Betriebes, wie er im Nennpunkt vorliegt, entfallen in (1) und (4) die zeitlichen Ableitungen. Für Ständerstrom und -spannung ergibt sich folgende Komponentendarstellung:

$$i_{Sd} = i_{\mu R}, \tag{5}$$

$$i_{Sq} = T_R \cdot (\omega_{\mu R} - \omega) \cdot i_{\mu R}, \tag{6}$$

$$u_{Sd} = R_S i_{Sd} - \sigma L_S \omega_{\mu R} i_{Sq}, \tag{7}$$

$$u_{Sq} = R_S i_{Sq} + L_S \omega_{\mu R} i_{Sd}. \tag{8}$$

Das von der Maschine entwickelte innere Moment kann durch die Komponenten des Ständerstromes ausgedrückt werden:

$$\frac{2}{3} \frac{m_i}{z_p} = (1 - \sigma) L_S i_{Sq} i_{Sd}. \tag{9}$$

Die von der Maschine im Nennpunkt aufgenommene Wirkleistung gewinnt man aus dem Punktprodukt von Ständerspannungs- und Ständerstromvektor:

$$u_S i_S \cos \varphi = R_S i_S^2 + \frac{2}{3} \frac{m_i}{z_p} \omega_{\mu R}. \tag{10}$$

Sie setzt sich aus der im Ständerwiderstand umgesetzten Leistung und der Luftspaltleistung zusammen.
Der Betrag des Spannungsvektors u_S kann durch die geometrische Summe der Komponenten ermittelt werden:

$$u_S^2 = R_S^2 i_S^2 + 2 R_S \frac{2}{3} \frac{m_i}{z_p} \omega_{\mu R} + \omega_{\mu R}^2 L_S^2 \cdot (i_S d^2 + \sigma^2 i_{Sq}^2). \tag{11}$$

Nach Vernachlässigung des Summanden $\sigma^2 i_{Sq}^2$ in (11) ist der mathematische Algorithmus zur Berechnung der Parameter ableitbar.

2. Parameterermittlung

Der Ständerwiderstand und die Ständerinduktivität sind durch eine aufwandarme Gleichstrom- und Leerlaufmessung in guter Näherung bestimmbar.
Das innere Moment der Maschine jedoch kann nicht aus der auf dem Typenschild angegebenen Leistung berechnet werden, und wird deshalb aus (10) bestimmt:

$$\frac{m_i}{z_p} = \frac{3}{2} \frac{1}{\omega_{\mu R}} (u_S i_S \cos \varphi - R_S i_S^2). \tag{12}$$

Es folgt die Berechnung der Längskomponenten des Ständerstromes aus (11):

$$i_{Sd} = \frac{1}{\omega_{\mu R} L_S} \left(u_S^2 - R_S^2 i_S^2 - 2 R_S \frac{2}{3} \frac{m_i}{z_p} \omega_{\mu R} \right)^{1/2}. \tag{13}$$

Die Querkomponente des Ständerstromes ergibt sich mit dem Pythagoras zu:

$$i_{Sq} = (i_S^2 - i_{Sd}^2)^{1/2}. \tag{14}$$

Mit (9) kann die Streuziffer ermittelt werden:

$$\sigma = 1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{m_i}{z_p} \cdot \frac{1}{L_S i_{Sq} i_{Sd}}. \tag{15}$$

Ebenso folgt die Rotorzeitkonstante bei Nennbedingungen aus (6):

$$T_R = \frac{i_{Sq}}{(\omega_{\mu R} - \omega) i_{Sd}}. \tag{16}$$

Damit sind auch die für das dynamische Verhalten der Asynchronmaschine signifikanten Parameter bestimmbar:

$$\omega_{Sk} = \frac{R_S}{\sigma L_S}, \tag{17}$$

$$\omega_{RK} = \frac{1}{\sigma T_R}. \tag{18}$$

3. Beispiel

Zur Verdeutlichung der Handhabbarkeit des Verfahrens wird die Berechnung der Parameter der Asynchronkurzschlußläufermaschine KMR 80 K4 aus folgenden Typenschildangaben vorgenommen:

$U_n = 127/220$ V $\triangle/\curlywedge$
$I_n = 8{,}1/4{,}7$ A
$\cos \varphi_n = 0{,}78$
$f_n = 50$ Hz
$n_n = 1410$ min^{-1}.

Die Beträge der Spannungs- und Stromvektoren ergeben sich nach der Definition in [1] aus den Spitzenwerten der Phasengrößen:

$u_S = \sqrt{2}\, U_{n\triangle} = 180$ V,
$i_S = \sqrt{2}\, I_{n\curlywedge} = 6{,}65$ A.

Die experimentell ermittelten Ständerparameter sind:

$R_S = 3{,}15\ \Omega$,

$L_S = 0{,}13$ H.

Schließlich werden die Größen des Nennbetriebes berechnet:

$m_i = 7{,}58$ Nm
$i_{Sd} = 4{,}02$ A
$i_{Sq} = 5{,}30$ A
$\sigma = 0{,}087$
$T_R = 0{,}070$ s
$\omega_{RK} = 164$ s^{-1}
$\omega_{SK} = 278$ s^{-1}

Literatur

[1] *Kovačs, K. P.; Racs, I.:* Transiente Vorgänge in Wechselstrommaschinen. Budapest 1959
[2] *Blaschke, F.:* Das Verfahren der Feldorientierung zur Regelung der Drehfeldmaschine. Dissertation, TU Braunschweig 1974

EA 5798

Dipl.-Ing. *Holger König* ist wissenschaftlicher Assistent an der TU Karl-Marx-Stadt, Sektion Automatisierungstechnik.

Zur Identifikation der Modellparameter elektrischer Maschinen mit stochastischer Optimierung

Teil 2: Globalitätswahrscheinlichkeit von mit Zufallssuchverfahren gefundenen Extrema

V. Diedrichs, Rostock

Verwendete Formelzeichen und Indizes

B, G	Gebiete im R^n
d	Abstand im R^n
f	Dichtefunktion
$I(\,)$	Inhalt von ( )
n	Dimensionsanzahl
P, φ	Wahrscheinlichkeit
R^n	n-dimensionaler metrischer Raum
$\underline{x}$	Einflußgrößenvektor
α, β	halbe Kantenlängen der Hyperquader G bzw. B
σ	Standardabweichung
λ	Anzahl der Vektorrealisierungen
μ	Erwartungswert
ξ	Funktion
$\forall$	Allquantor
$\exists$	Existentialquantor
$\wedge$	log. Konjunktion
$(\,) \rightarrow (\,)$	log. Implikation
$\in$	Element von
$\notin$	nicht Element von
i	Laufvariable für die Dimension
o	Mittelpunkt von G
g	Globalität

1. Problem- und Zielstellung

Die Aufgabe der Extremierung einer von einem Einflußgrößenvektor $\underline{x} = (x_i), i = 1 \cdots n$ abhängigen skalaren Gütefunktion $\xi(\underline{x})$:

$$\xi(\underline{x}) \rightarrow \text{Extremum} \tag{1}$$

stellt eine Klasse allgemeiner Optimierungsprobleme dar [1]. Bedingt durch Eigenschaften von (1) scheiden analytische Problemlösungen oft aus, weshalb numerische Verfahren eingesetzt werden. Durch die Anwendung global konvergenter Verfahren [2] ist bei der Erfüllung des Satzes von *Weierstrass* [3] (Existenzbedingung für Extrema) mindestens ein Extremum $(\underline{x}^*)$ mit Sicherheit auffindbar. Die Identifikation von $(\underline{x}^*)$ als lokales oder globales Extremum gelingt jedoch nicht, wenn nicht spezielle globale Eigenschaften [z. B. Konvexität von $\xi(\underline{x})$] vorausgesetzt werden können.

Publikationen [4] [5] enthalten u. a. Hinweise auf die Veränderung der Startwerte der numerischen Verfahren, um durch veränderte Schrittfolgen im R^n ggf. in andere Extrema einzulaufen. Deren Anzahl kann nach [6] für bestimmte Problemtypen jedoch exponentiell wachsend mit der Dimensionsanzahl n des Suchraumes: $\exp(\alpha n)$ abgeschätzt werden. Da die Wahl der Anfangsbedingungen sowie die Anzahl der Wiederholungen nicht objektiviert wird, kann theoretisch begründetem Finden eines Extremums z. T. subjektives Probieren bei dessen Globalitätsprüfung gegenüberstehen.

Insbesondere mit den in letzter Zeit auch für die Behandlung technischer Probleme eingesetzten Evolutionsstrategien [7] bis [12] stehen Zufallssuchverfahren zur Verfügung, die u. a. hinsichtlich Verteilungstypen, -parametern und Mutantenanzahlen theoretisch begründet sind und Näherungslösungen von (1) liefern. Charakteristisch für diese Strategien ist, daß von analytischen Eigenschaften der Funktion $\xi(\underline{x})$ weitestgehend abstrahiert wird.

Dr. sc. techn. *Volker Diedrichs* ist wissenschaftlicher Assistent an der Ingenieurhochschule für Seefahrt Warnemünde/Wustrow, Sektion Schiffsbetriebstechnik, Wissenschaftsbereich Schiffselektrotechnik.

Offen erscheinen im Rahmen dieser Strategien die Aspekte

- der Beurteilung der Eigenschaft der Globalität eines gefundenen Extremums $\xi(\underline{x}^*)$ sowie
- sich daraus ergebende Gesichtspunkte für die Gestaltung des stochastischen Suchverfahrens selbst.

Problementsprechend besteht das Ziel in der Beurteilung der Globalitätswahrscheinlichkeit von mit Zufallssuchverfahren gefundenen Extrema und der Ableitung sich daraus ergebender Gesichtspunkte für die Globalitätsprüfung innerhalb von Zufallssuchverfahren. Die Betrachtungen ordnen sich damit in den Problemkreis der Monte-Carlo-Methoden zur globalen Minimierung von Zielfunktionen [13] ein.

2. Ansatz

Aus der Hypothese: $\xi(\underline{x}^*)$ sei lokales Minimum, folgt die Aussage, daß ein Gebiet G im R^n mit der Eigenschaft $\xi(\underline{x} \in G) < \xi(\underline{x}^*)$ existiert. (Die Betrachtung von Minimierungsproblemen bedeutet keine Einschränkung, da Maximierungsprobleme: $\xi(\underline{x}) \rightarrow$ Max dem Minimierungsproblem: $-\xi(\underline{x}) \rightarrow$ Min äquivalent sind.) Formal dargestellt:

$$\exists G \mid G \in R^n \wedge \xi(\underline{x} \in G) < \xi(\underline{x}^*). \tag{2}$$

Im Gegensatz zu lokalen Methoden, solchen, die Informationen in der Umgebung eines Punktes für die Gestaltung weiterer Schritte ausnutzen, stehen bei der Zufallssuche globale Informationen zur Verfügung. Die Nutzung dieser Informationen über die Wahrscheinlichkeit der Existenz von $G \in R^n$ stellt den problementsprechenden Ansatz dar.

3. Beziehungen im R^n

Abstand im R^n:

$$d(\underline{x}_1, \underline{x}_2) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_{1i} - x_{2i})^2}.$$

Gebietsintegrale im R^n (zur Inhaltsbestimmung von G):

$$I(G) = \int_{G}^{n} \cdots \int dg. \tag{3}$$

Zur Vermeidung krummliniger Koordinatentransformationen bei der Berechnung von Gebietsintegralen durch n-dimensionale Integrale wird vorausgesetzt, daß G ein Normalbereich des R^n, speziell die Quaderumgebung Q eines Punktes $\underline{x}_0 \in R^n$ der Form

$$Q(\underline{x}_0): x_{oi} - \alpha_i \leqq x_i \leqq x_{oi} + \alpha_i \tag{4}$$

sei [14].

4. Globalitätswahrscheinlichkeit des Extremums $(\underline{x}^*)$

Für die Wahrscheinlichkeit, daß λ zufällig und unabhängig voneinander erzeugte Vektoren $\underline{x}$ außerhalb G liegen, gilt:

$$P(\forall \underline{x} \mid \underline{x} \notin G) = [1 - P(x \in G)]^{\lambda}. \tag{5}$$

Aus (5) folgt für die Wahrscheinlichkeit, daß von den λ Vektoren mindestens einer innerhalb G liegt [und damit für die Lokalitätswahrscheinlichkeit von $\xi(\underline{x}^*)$]:

$$P(\exists \underline{x} \mid \underline{x} \in G) = 1 - [1 - P(\underline{x} \in G)]^{\lambda}. \tag{6}$$

Gleichung (6) führt die Erfolgswahrscheinlichkeit der Suche von G mit Vektorrealisierungen auf die eines Vektors $P(\underline{x} \in G)$ zurück.

Unter der Voraussetzung einer stetigen, n-dimensional unabhängigen Dichtefunktion über G:

$$f(g) = \prod_{i=1}^{n} f(g_i)$$

folgt für diese Wahrscheinlichkeit

$$P(\underline{x} \in G) = \int_{G}^{n} \cdots \int f(g)\, dg \tag{7}$$

und unter Berücksichtigung von (4)

$$P(\underline{x} \in G) = \prod_{i=1}^{n} \left[\int_{x_{oi} - \alpha_i}^{x_{oi} + \alpha_i} f(x_i)\, dx_i \right]. \tag{8}$$

Nach Anwendung des Mittelwertsatzes [15] auf (8) folgt

$$P(\underline{x} \in G) = \prod_{i=1}^{n} (2\,\alpha_i f(Z_i)); x_{oi} - \alpha_i \leqq Z_i \leqq x_{oi} + \alpha_i . \tag{9}$$

Da nach (3) und (4) für den Inhalt von G: $I(G) = \prod_{i=1}^{n} (2\alpha_i)$ gilt, folgt aus (9):

$$\frac{P(\underline{x} \in G)}{I(G)} = \prod_{i=1}^{n} f(Z_i); x_{oi} - \alpha_i \leqq Z_i \leqq x_{oi} + \alpha_i \tag{10}$$

mit der Grenzeigenschaft für den Quotienten $P(\underline{x} \in G)/I(G)$:

$$\lim_{\alpha_i \to 0} \frac{P(\underline{x} \in G)}{I(G)} = \prod_{i=1}^{n} f(x_{oi}). \tag{11}$$

Mit (11) kann für hinreichend kleine Gebiete G (8) abgeschätzt werden. Damit folgt aus (6) für die Lokalitätswahrscheinlichkeit von $\xi(\underline{x}^*)$ die Abschätzung

$$P(\exists\, \underline{x} | \underline{x} \in G) \approx 1 - \left[1 - I(G) \prod_{i=1}^{n} f(x_{oi})\right]^{\lambda}. \tag{12}$$

Unter Berücksichtigung der getroffenen Voraussetzungen über G und die Dichtefunktionen bei der Zufallssuche gilt somit die Implikation:

$$[\exists G | G \in R^n \wedge (\underline{x} \in G) < \xi(\underline{x}^*)] \rightarrow$$
$$\left\{P(\exists\, \underline{x} | \underline{x} \in G) \approx 1 - \left[1 - I(G) \prod_{i=1}^{n} f(x_{oi})\right]^{\lambda}\right\}. \tag{13}$$

Hinsichtlich der Beurteilung von mit Zufallssuchverfahren gefundenen Extrema ergeben sich folgende Schlußfolgerungen grundsätzlicher Art:

1. Der nach λ Vektorrealisierungen erfolgende Abbruch von Zufallssuchverfahren bei nicht mehr erfolgender Verbesserung des gefundenen Punktes $\underline{x}^* \in R^n$ ermöglicht aus der Kontraposition der Implikation (13) die Identifikation von (12) mit der Globalitätswahrscheinlichkeit für das gefundene Extremum $\xi(\underline{x}^*)$.
2. Aussagen über die Wahrscheinlichkeit der Eigenschaft Globalität sind nur in bezug auf
   — ein Inhaltsmaß von G
   — die bei der Suche benutzten Verteilungsfunktionen und -parameter sowie
   — die Lage von G im R^n (insbesondere bezüglich eines Abstandsmaßes)
   möglich. Diese Abhängigkeiten sind ggf. zur Gestaltung der zur Globalitätsprüfung dienenden Komponente stochastischer Suchverfahren (z. B. die $(1 + \lambda)$-Strategie nach [12]) ausnutzbar.
3. Aus (6) und (8) folgt für eine von Null verschiedene Findewahrscheinlichkeit $P(\exists\, \underline{x}/\underline{x} \in G) > 0$:

$$\prod_{i=1}^{n} \left[\int_{x_{oi} - \alpha_i}^{x_{oi} + \alpha_i} f(x_1)\, dx_1\right] > 0.$$

In Verbindung mit der Eigenschaft stetiger Dichtefunktionen

$$0 \leqq \int_{x_1}^{x_2} f(x)\, dx \leqq 1$$

folgt daraus für $n \to \infty$ die Forderung

$$\int_{x_{oi} - \alpha_i}^{x_{oi} + \alpha_i} f(x_1)\, dx_1 \to 1.$$

Konsequenz ist, daß eine mit einer Findewahrscheinlichkeit größer Null erfolgende Zufallssuche von G bei $n \to \infty$ nur möglich ist, wenn die Koordinaten von G im R^n (zur Festlegung der Parameter der Dichtefunktion) bekannt sind. Anders: in dem Maße, wie die Dimensionsanzahl n des Problems zunimmt, wird die Zufallssuche zur Globalitätsprüfung von ermittelten Extrema praktisch sinnlos und die Frage nach der Eigenschaft der Globalität (von mit Zufallssuchverfahren zu bestimmenden Extrema) entleert!

5. Suchstrategien zur Globalitätsprüfung

Bei voraussetzungsgemäß fehlender Information über die Lage von G in R^n lassen sich mit Rücksicht auf technische Hintergründe von (1) folgende Problemtypen unterscheiden:

a) $G \in R^n$ (unbeschränkter Suchraum)

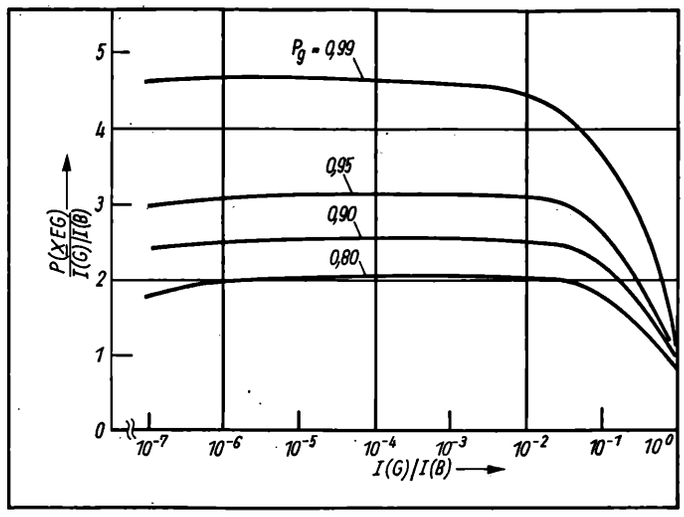


Bild 1. Durch Zufallssuchverfahren (im Vergleich zur Enumeration) minimal zu realisierende Wahrscheinlichkeit $P(\underline{x} \in G)$ in Abhängigkeit des Anteils von G in B. [Normierte Darstellung von (17) für unterschiedlich geforderte Globalitätswahrscheinlichkeiten $p_g = P(\exists\, \underline{x}/\underline{x} \in G)$]

b) $G \in B \in R^n$ (auf B beschränkter endlicher Suchraum) — sowie: keine Differenzierung von B hinsichtlich der erforderlichen Findewahrscheinlichkeit von G

c) $G \in B \in R^n$ (auf B beschränkter endlicher Suchraum) — sowie: existierende Differenzierung von B hinsichtlich der erforderlichen Findewahrscheinlichkeit v on G.

Aus technischer Sicht stellen die unter b) und c) genannten wesentliche Klassen technischer Problemtypen dar, da aus der allgemein nur in einem endlichen Bereich gegebenen Variationsmöglichkeit der Komponenten x des Einflußvektors $\underline{x}$ eine Beschränkung des R^n auf B folgt. Konsequenz der vorausgesetzt fehlenden Information über die Lage von G ist, daß zwischen zwei Grundtypen von Suchstrategien bezüglich der Problemtypen b) und c) unterschieden werden kann (wenn keine Nutzung analytischer Eigenschaften von (1) erfolgt!):

— Enumeration von B
— Zufallssuche in B.

Hinsichtlich des Problemtyps a) gibt es zur Zufallssuche im R^n keine Alternative. Neben der Entscheidung zugunsten einer Suchstrategie besteht bei letzterer das Erfordernis der Festlegung von Verteilungstypen und -parametern.
Aus den Inhaltsmaßen von G und B nach (3) und (4):

$$I(G) = \prod_{i=1}^{n} (2\,\alpha_i); I(B) = \prod_{i=1}^{n} (2\,\beta_i) \tag{14}$$

folgt bei Enumeration von B für eine zu realisierende Globalitätswahrscheinlichkeit bei der Globalitätsprüfung $p_g = P(\exists\, \underline{x}/\underline{x} \in G)$ die notwendige Anzahl λ von Vektorrealisierungen zu:

$$\lambda = p_g \frac{I(B)}{I(G)} = p_g \prod_{i=1}^{n} \frac{\beta_i}{\alpha_i}. \tag{15}$$

Die bei Zufallssuchverfahren im R^n erforderliche Anzahl beträgt nach (6)

$$\lambda = \frac{\ln(1 - p_g)}{\ln[1 - P(\underline{x} \in G)]}. \tag{16}$$

Eine Bevorzugung von Zufallssuchverfahren gegenüber Enumeration ist möglich, wenn bei gleicher zu realisierender Globalitätswahrscheinlichkeit p_g eine geringere Anzahl zu erzeugender Vektoren λ hinreichend ist. Aus (15) und (16) folgt daraus für die bei Zufallssuchverfahren erforderliche Wahrscheinlichkeit $P(\underline{x} \in G)$:

$$P(\underline{x} \in G) > 1 - (1 - p_g)^{\frac{1}{p_g} \frac{I(G)}{I(B)}}. \tag{17}$$

Bild 1 stellt diese Abhängigkeit normiert dar.
Zur Charakterisierung unterschiedlicher Zufallssuchstrategien erfolgt für ausgewählte Verteilungstypen [16] [17] unter Nutzung der Näherung (11) die Angabe des für den Vergleich mit der Enumeration von B wesentlichen Quationten $P(\underline{x} \in G)/[I(G)/I(B)]$:

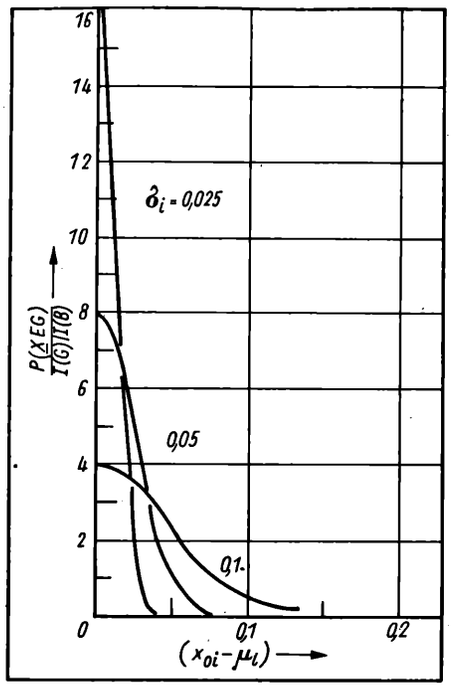


Bild 2. Wahrscheinlichkeit des Auffindens von G bei normalverteilter Zufallssuche in Abhängigkeit des Abstandes zwischen dem Mittelpunkt von G: x_{oi} und dem Erwartungswert der Suchverteilung μ_i: $(x_{oi} - u_i)$. [Darstellung von (19) für $n = 1$, $I(B) = 1$, $2\,a_i = 10^{-3}$ und verschiedene Streuungen σ_i]

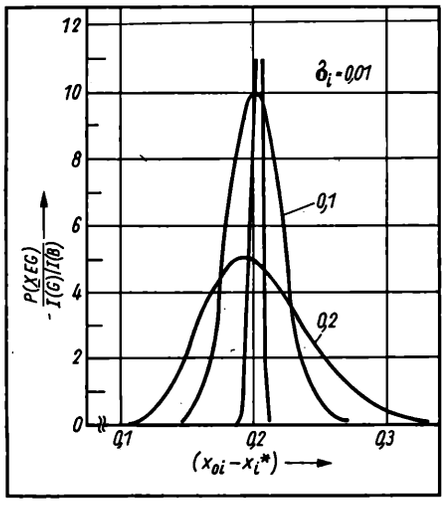


Bild 3. Wahrscheinlichkeit des Auffindens von G bei symmetrisch-logarithmisch-normalverteilter Zufallssuche in Abhängigkeit des Abstandes zwischen dem Mittelpunkt von G: x_{oi} und dem auf Globalität zu prüfenden Extremum x_i^*: $(x_{oi} - x_i^*)$ für ein konstantes $\mu_i = \ln(0{,}2)$. [Darstellung von (20) für $n = 1$, $I(B) = 1$, $2\,a_i = 10^{-3}$ und verschiedene σ_i]

— gleichverteilte Zufallssuche in B

$$\frac{P(\underline{x} \in G)}{I(G)/I(B)} = 1 \tag{18}$$

— normalverteilt-unkorrelierte Zufallssuche im R^n

$$\frac{P(\underline{x} \in G)}{I(G)/I(B)} = I(B) \prod_{i=1}^{n} \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_i} \exp\left(- \frac{(x_{oi} - \mu_i)^2}{2\,\sigma_i^2} \right) \right] \tag{19}$$

— symmetrisch lognormalverteilte-unkorrelierte Zufallssuche im R^n

$$\frac{P(\underline{x} \in G)}{I(G)/I(B)} = \begin{cases} 0; x_{oi} = 0 \\ I(B) \prod_{i=1}^{n} \left[\frac{1}{2\sqrt{2\pi}\,\sigma_i\,(|x_{oi} - x_i^*|)} \right. \\ \left. \exp\left(- \frac{(\ln(|x_{oi} - x_i^*|) - \mu_i)^2}{2\,\sigma_i^2} \right) \right]; \quad x_{oi} \neq 0 \end{cases} \tag{20}$$

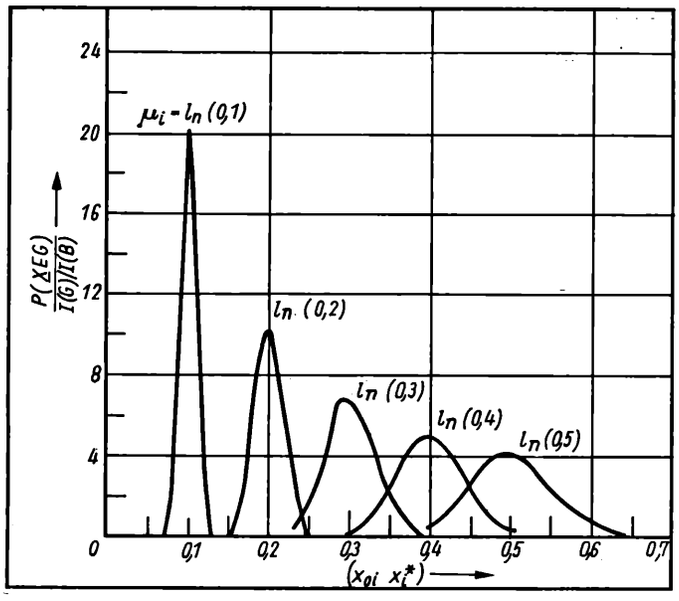


Bild 4. Wahrscheinlichkeit des Auffindens von G bei symmetrisch-logarithmisch-normalverteilter Zufallssuche in Abhängigkeit des Abstandes zwischen dem Mittelpunkt von G: x_{oi} und dem auf Globalität zu prüfenden Extremum x_i^*: $(x_{oi} - x_i^*)$ für konstantes σ_i. [Darstellung von (20) für $n = 1$, $I(B) = 1$, $2\,a_i = 10^{-3}$ und verschiedene μ_i]

Die Gln. (17) bis (20) ermöglichen folgende Aussagen:

1. Die betrachteten Zufallssuchstrategien ermöglichen mit Ausnahme der gleichverteilten Zufallssuche gegenüber der Enumeration von B die Konstruktion von Suchfenstern in B durch den Verteilungsparameter Streuung. Dabei nimmt, wie in den Bildern 2 und 3 deutlich wird, die Suchfensterbreite mit zunehmender Suchfensterwahrscheinlichkeit erwartungsgemäß ab.
2. Die Positionierung des Suchfensters ist durch den Verteilungsparameter Erwartungswert möglich. Während bei der normalverteilten Zufallssuche dabei der Vektor der Erwartungswerte $\mu = (\mu_i)$, $i = 1 \cdots n$ und damit Suchrichtung und -abstand im R^n festzulegen ist (Sonderfall $\underline{\mu} = \underline{x}^*$), kann bei der symmetrisch lognormalverteilten Zufallssuche ein Abstandsmaß

$$d(\underline{x}_0 - \underline{x}^*) : \mu_i = \ln\left(\sqrt{(d(\underline{x}_0 - \underline{x}^*))^2/n}\right)$$

ausreichen (Bild 4).

6. Schlußfolgerungen

1. Aus dem Ablauf von Zufallssuchverfahren zum Finden von Extrema einer Zielfunktion (Anzahl der Suchschritte, Verteilungstypen und -parameter beim Suchen) kann ohne Nutzung deren analytischer Eigenschaften auf die Globalitätswahrscheinlichkeit gefundener Extrema geschlossen werden. Derjenige Anteil des Suchraumes, über den Aussagen mit hoher Wahrscheinlichkeit hinsichtlich der Eigenschaft Globalität möglich sind, nimmt bei gleichem Suchaufwand mit zunehmender Dimensionsanzahl des Raumes ab.
   Zufallssuchstrategien zur darüber hinausgehenden Prüfung der Eigenschaft der Globalität des gefundenen Extremums sind möglich, verlieren jedoch mit zunehmender Dimensionsanzahl und/oder zunehmender Begrenztheit des zur Prüfung möglichen Aufwandes (Rechenzeit) ihren praktischen Sinn.
   Aus beidem folgt, daß die Entscheidung zugunsten einer speziellen Globalitätsprüfung schon ermittelter Extrema problemabhängig und mit dem Begriff der Globalitätswahrscheinlichkeit quantitativ begründbar ist.
2. Die nach (12) die Globalitätswahrscheinlichkeit bestimmenden Einflußgrößen ermöglichen eine objektivierte Globalitätsprüfung. Subjektives Probieren ist deshalb bei Entscheidungen zugunsten einer zusätzlichen Prüfung der Eigenschaft der Globalität schon bestimmter Extrema durch Zufallssuche überwindbar, wenn vor allem die Parameter der eingesetzten Verteilungstypen aus der speziellen Aufgabe begründet werden können.
3. Bezüglich des Problemtyps a) gibt es zur Zufallssuche, bezüglich des Problemtyps b) zur Enumeration im allgemeinen keine

Alternative. Bei erstgenanntem scheidet Enumeration aus, bei letztgenanntem Problemtyp führt die Verwendung stetiger Dichtefunktionen nur partiell zu einer höheren Findewahrscheinlichkeit von G in B, als diejenige, die nach Bild 1 zur Bevorzugung von Zufallssuchverfahren im gesamten Bereich B erforderlich wäre.

4. Im Fall des Problemtyps c) ist die Entscheidung zugunsten einer Zufallssuche in B oder Enumeration von B abhängig von der Strukturierung hinsichtlich der geforderten Findewahrscheinlichkeit und damit von der Aufgabenstellung. Durch eine dem speziellen Problem angepaßte Konstruktion von Suchverteilungen [18] kann deshalb eine Reduzierung des Suchaufwandes gegenüber Enumeration erreicht werden.
5. Für die Globalitätswahrscheinlichkeit eines mit der $(1, \lambda)$-Evolutionsstrategie auf der Grundlage der Normalverteilung gefundenen Extremums gelten die im Bild 2 dargestellten Verhältnisse. Dessen darüber hinausgehende Globalitätsprüfung mit der $(1 + \lambda)$-Evolutionsstrategie [12] ist dann zweckmäßig auf der Grundlage einer symmetrischen logarithmischen Normalverteilung nach (20) gestaltbar. In diesem Fall wird durch die Kombination beider Verteilungstypen der Aussagebereich bezüglich der Globalitätswahrscheinlichkeit (Bilder 2 und 4) größer als bei ausschließlicher Verwendung der Normalverteilung.

Literatur

[1] Lexikon der Mathematik. Leipzig: VEB Bibliographisches Institut 1985
[2] *Bialy, H.; Olbrich, M.:* Optimierung. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1975
[3] *Bronstein, I.; Semendjajew, K.:* Taschenbuch der Mathematik. Leipzig: BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft 1969
[4] *Elster, K. H.:* Nichtlineare Optimierung. Leipzig: BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft 1978
[5] *Horst, R.:* Nichtlineare Optimierung. München, Wien: Carl Hauser Verlag 1979
[6] *Ebeling, W.; Engel, A.:* Models of Evolutionary Systems and Their Application to Optimisation Problems. Syst. Anal. Model. Simul., Berlin 3 (1986) 5, S. 377 bis 385
[7] *Muth, C.:* Einführung in die Evolutionsstrategie. rt 30 (1982) 9, S. 297–303
[8] *Ruppert, M.:* Reglersynthese mit Hilfe der mehrgliedrigen Evolutionsstrategie. rt 31 (1983) 8, S. 273
[9] *Kühne, M.; Pagel, W.:* Optimierung von Vorschiffsformen mit Hilfe der Evolutionsstrategie. Schiffbauforschung 23 (1984) 3, S. 177–179
[10] *Waldmann, W.; Teil, G.:* Kurvenanpassung und Lastflußoptimierung mittels Evolutionsstrategie. EuM 102 (1985) 12, S. 518
[11] *Ziegler, A.; Rucker, W.:* Die Optimierung der Strahlungscharakteristik linearer Antennengruppen mit Hilfe der Evolutionsstrategie. AEÜ 40 (1986) 1, S. 15 bis 18
[12] *Diedrichs, V.:* Zur Identifikation der Modellparameter elektrischer Maschinen mit stochastischer Optimierung. Teil 1: Allgemeiner Algorithmus auf der Grundlage der $(1^+, \lambda)$-Evolutionsstrategie. ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 5, S. 193 u. 194
[13] *Hengartner, W.; Theodorescu, R.:* Einführung in die Monte-Carlo-Methode. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften 1978
[14] *Körber, K. H.; Pforr, E. A.:* Integralrechnung für Funktionen mit mehreren Variablen. Leipzig: BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft 1974
[15] *Pforr, E. A.; Schirotzek, W.:* Differential- und Integralrechnung für Funktionen mit einer Veränderlichen. Leipzig: BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft 1973
[16] *Fisz, M.:* Wahrscheinlichkeitsrechnung und mathematische Statistik. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften 1980
[17] *Storm, R.:* Wahrscheinlichkeitsrechnung, Mathematische Statistik, Statistische Qualitätskontrolle. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1979
[18] *Hänel, H.:* Zur digitalen Erzeugung von Zufallszahlen mit vorgeschriebener Verteilungsdichte. AEÜ 35 (1981) 4, S. 156–162

EA 5804

In Kürze erscheint

Elektrische Maschinen — Berechnung rotierender elektrischer Maschinen

Von Prof. Dr. sc. techn. Karl Vogt. Berlin: VEB Verlag Technik 1988. 4., bearbeitete Auflage. 506 Seiten, 542 Bilder, 50 Tafeln. Kunstleder 36,— Mark. Bestell-Nr. 5538875

Das Buch gehört zum Hochschullehrwerk „Elektrische Maschinen". Es werden alle zum Entwurf und zur Konstruktion elektrischen Maschinen notwendigen Berechnungsformalismen angegeben und an Beispielen erläutert. Grundsätzlich wird von den Berechnungselementen ausgegangen und damit zunächst vom speziellen Erzeugnis abstrahiert, weshalb die aufbereiteten Berechnungsalgorithmen vielfältig anwendbar sind. Grundkenntnisse über Aufbau und Wirkungsweise elektrischer Maschinen werden vorausgesetzt. Das Buch ist für die Weiterbildung von großem Wert. Die Bearbeitung berücksichtigt moderne Verfahren zur numerischen Feldberechnung sowie zur Berechnung dauermagnetisch erregter Magnetkreise. Ein Abschnitt über Zeitkonstanten der Gleichstrommaschine wurde aufgenommen.

Die Redaktion

Beanspruchungen von Synchronmaschinen im Asynchronbetrieb

Teil 1: Turbogeneratoren

M. Krause, KDT, Bitterfeld

Mit dem ständig steigenden Ausbau der Elektroenergiesysteme (EES) werden weltweit Anstrengungen unternommen, komplexe Antihavarieautomatiken (AHA) zu entwickeln. In diese Automatiksysteme sind sowohl die Elektroenergieversorgungs- als auch die -übertragungsanlagen einzubeziehen. Dabei kommt dem Turbogeneratorblock (TGB) als Kernstück der Elektroenergieerzeugung im Kraftwerk, dessen Einheitsleistungen in den letzten Jahren immer mehr angestiegen sind (1000 MW und größer), eine erhöhte Bedeutung zu. Bei der Realisierung dieser Aufgabe ergibt sich die Notwendigkeit, nichtstationäre Betriebsregime zu untersuchen. Darunter sind transiente Übergangs- bzw. Ausgleichsvorgänge und quasistationäre sowie asynchrone Betriebsregime zu verstehen. In diesem Beitrag werden Aussagen zu asynchronen Betriebszuständen von Turbogeneratoren und den dabei auftretenden Beanspruchungen gemacht. In Tafel 1 ist ein allgemeiner Überblick zu deren Ursachen und Folgen angegeben.

Durch die Realisierung eines kurzzeitigen Asynchronbetriebes ergeben sich für den kraftwerkstechnologischen Prozeß und für die Regimefahrweise des EES folgende Vorteile:

— Weiterbetrieb der Dampferzeugereinheiten ist mit Leistungseinsenkungen möglich
— lange Wiederanfahrzeiten und somit erhöhter Elektroenergieerzeugungsausfall erübrigen sich.

Um eine verbindliche Aussage über die Zulässigkeit des Asynchronbetriebes treffen zu können, ist eine standortspezifische Prüfung unter Einhaltung folgender Gesichtspunkte notwendig:

— Aufrechterhaltung der Gesamtstabilität des Netzes und damit verbunden die Verhinderung eines totalen Netzzusammenbruchs
— Verhinderung von Störungseskalationen durch Spannungs- und Frequenzlawinen infolge des Entstehens von lokalen Teilsystemen mit großen Leistungsungleichgewichten
— Quantifizierung der Beanspruchungen des Turbogeneratorblockes während des Asynchronbetriebes
— Auswirkung des Asynchronbetriebes auf den Kraftwerkseigenbedarf mit vertretbaren Einschränkungen des technologischen Regimes.

Die in Tafel 1 angegebenen asynchronen Betriebszustände lassen sich wie folgt charakterisieren:

- Asynchronbetrieb ohne Erregung

Nach dem Verlust der Erregung fällt die Synchronmaschine aus dem Synchronismus. Die Erregerwicklung übt nun in Abhängigkeit ihres ohmschen Widerstandes eine dämpfende Wirkung aus. Es ist

Tafel 1. Übersicht zu asynchronen Betriebszuständen

Asynchronbetrieb	
Asynchronbetrieb mit Erregung (pole-slipping)	Asynchronbetrieb ohne Erregung (asynchronous running)
Störung der: transienten Stabilität statischen Stabilität	Ausfall der Erregung
hohe elektrische, thermische und mechanische Beanspruchung	gemäßigte elektrische, thermische und mechanische Beanspruchung

Dipl.-Ing. *Matthias Krause* ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im VE Chemiekombinat Bitterfeld, Hauptbereich Energie- und Wasserwirtschaft, und war z. Z. der Abfassung wissenschaftlicher Assistent an der Ingenieurhochschule Zittau, Sektion Elektroenergieversorgung.

möglich, sie mit offenen Klemmen oder über einen Zusatzwiderstand kurzgeschlossen zu betreiben. Im letzteren Fall entspricht das elektrische Verhalten der Synchronmaschine dem der Asynchronmaschine mit Doppelkäfigläufer. Mit dem Zusatzwiderstand erreicht man eine Verbesserung der Symmetrie und damit eine Einsenkung der Schwingungen der Betriebsgrößen. Positiv wirkt sich weiterhin aus, daß damit gleichzeitig ein Schutz der Erregerwicklung vor Überspannungen erreicht wird. Als Nachteil aus Sicht des Netzes ist zu verzeichnen, daß die Synchronmaschine die zur Magnetisierung notwendige Blindleistung aus dem Netz bezieht. Damit verbunden ist die Erhöhung des Ständerstroms und die Einsenkung des Spannungsniveaus am Kraftwerksknotenpunkt. Um die Strombeanspruchung und somit die thermische Belastung in zulässigen Grenzen halten zu können, ist eine Reduzierung der mechanischen Antriebsleistung um etwa 40 bis 60% innerhalb eines Zeitbereichs < 1 s erforderlich [6]. Die Antriebe und Steuereinrichtungen bzw. -automatiken des Kraftwerkseigenbedarfs sind hinsichtlich ihrer zuverlässigen Arbeitsweise bei verändertem Spannungs- und Frequenzniveau zu überprüfen.

- Asynchronbetrieb mit Erregung (Außer-Tritt-Fall)

Dieses Betriebsregime stellt sich nach Verlust der Stabilität bei eingeschalteter Erregung ein. Dabei tritt eine Erhöhung der Läuferdrehzahl auf, so daß die Drehfelder des Läufers und des Ständers unterschiedliche Frequenzen aufweisen. Durch die angelegte Erregerspannung, die einen konstanten Stromfluß in der Erregerwicklung hervorruft, wird im Stator eine Spannung mit der Frequenz $(1-s)f_n$ induziert. Für diese Frequenz ist im Netz keine Spannungsquelle vorhanden. Im Stator bilden sich entsprechend dieser Spannung Kurzschlußströme aus, die sehr hohe Werte annehmen, so daß es zur thermischen und mechanischen Überlastung der Bauteile kommt. Dieses Regime ist für Synchronmaschinen nicht zulässig.

1. Beanspruchungen der Synchronmaschine im Asynchronbetrieb

1.1. Elektrische Beanspruchung

1.1.1. Auswirkungen des Asynchronbetriebes auf das EES

Der Blindleistungsbezug der Synchronmaschine hat ein Einsenken der Spannung am Kraftwerksknotenpunkt und eventuell entsprechend der Netztopologie und des Schaltzustandes an weiteren Knotenpunkten des Netzes zur Folge. Um dieses Blindleistungsdefizit kompensieren zu können, empfehlen sich prinzipiell folgende zwei Maßnahmen:

— Erhöhung der Erregung der parallel arbeitenden Generatoren
— Bereitstellung der Blindleistung durch das Netz (Veränderung des Schaltzustandes, Außerbetriebnahme eventuell vorhandener Kompensationsdrosseln).

Entsprechend der Theorie der Synchronmaschine läßt sich der schlupfabhängige Blindleistungsbedarf der SM im asynchronen Betrieb berechnen nach:

$$Q_{\text{mitt}} = \frac{U^2}{2}\left(\frac{1}{X_d}+\frac{1}{X_q}+\left(\frac{1}{X_{d'}}-\frac{1}{X_d}\right)\frac{(sT_{d'})^2}{1+(sT_{d'})^2}\right.$$
$$\left.+\left(\frac{1}{X_{d''}}-\frac{1}{X_{d'}}\right)\frac{j\,(sT_{d''})^2}{1+(sT_{d''})^2}+\left(\frac{1}{X_{q''}}-\frac{1}{X_q}\right)\frac{(sT_{q''})^2}{1+(sT_{q''})^2}\right). \quad (1)$$

In Tafel 2 sind für einige ausgewählte Generatoren Ergebnisse von Beispielrechnungen dargestellt. Es muß hervorgehoben werden, daß es sich hier um Näherungswerte handelt. Genaue Aussagen sind nur durch eine Stabilitätsrechnung unter der Berücksichtigung der asynchronen Fahrweise ausgewählter Generatoren möglich.

1.1.2. Auswirkungen des Asynchronbetriebes auf den Turbogenerator

Ein Asynchronbetrieb der Synchronmaschine ist nur mit ausgeschalteter Erregung möglich. Dabei bezieht die SM ihre gesamte zur Magnetisierung notwendige Blindleistung aus dem EES, was mit einer wesentlichen Erhöhung des Ständerstromes verbunden ist. Dem wird durch Einsenken der Turbinenleistung entgegengewirkt. Um hohe Überspannungen an den Klemmen der Erregerwicklung zu vermeiden, empfiehlt es sich, sie über einen Zusatzwiderstand kurzzuschließen. Aufgrund der vorhandenen Unsymmetrie des Läufers — die magnetischen Widerstände der Längsachse unterscheiden sich von denen der Querachse — treten Schwingungen im Verlauf der Systemgrößen (U, I, P, Q, δ) auf. Erhöht man die

Tafel 2. Durchschnittlicher Blindleistungsbezug der SM im stationären Asynchronbetrieb in MVAr

Betriebsbedingung		$U_k = 1{,}0\ U_n$		$U_k = 0{,}9\ U_n$		$U_k = 0{,}8\ U_n$	
S_n MVA	P_n MW	$s = 0{,}1\,\%$	$s = 0{,}05\,\%$	$s = 0{,}1\,\%$	$s = 0{,}05\,\%$	$s = 0{,}1\,\%$	$s = 0{,}05\,\%$
137,5	125	116,0	98,6	94,0	79,9	74,2	63,1
259	220	169,8	146,8	209,6	118,9	108,7	93,9
588	500	365,5	281,8	296,0	228,3	233,9	180,4
1111	1000	679,4	480,6	550,0	388,8	434,8	307,6

Resistanz des Erregerkreises, so verkleinert sich entsprechend (2) die Eigenzeitkonstante der Erregerwicklung:

$$T_{\text{fdo}} = X_{\text{fd}\sigma}/R_{\text{fd}}. \quad (2)$$

Das bewirkt eine Reduzierung der transienten Kurzschlußzeitkonstante der SM:

$$T_{d'} = \left(1-\frac{X_{ad}^2}{X_{\text{fd}\sigma}\,X_{ad}}\right)T_{\text{fdo}}. \quad (3)$$

Aus (5) geht hervor, daß der Betrag des Reaktanzoperators $\underline{X}_d\,(j\,s)$ maßgeblich von $T_{d'}$ bestimmt wird, was wiederum in (4) die Größe des resultierenden Momentes durch eine Verringerung der durch die Erregerwicklung hervorgerufenen Komponente des Momentes herabsetzt:

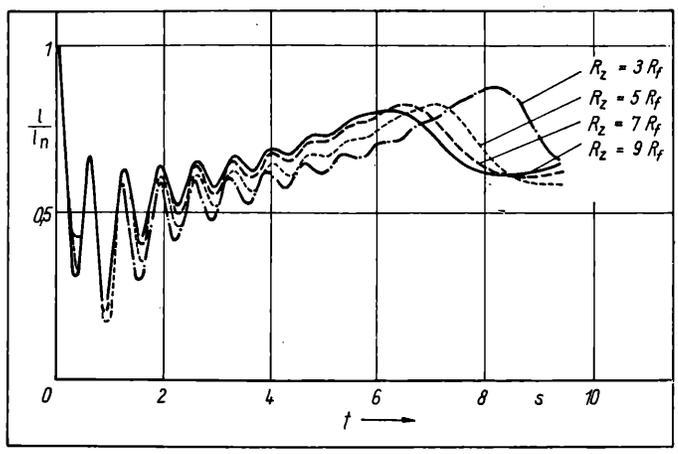
$$m = -\frac{1}{2}U^2\,\text{Im}\left\{\frac{1}{\underline{X}_d\,(j\,s)}+\frac{1}{\underline{X}_q\,(j\,s)}\right\}$$
$$-\frac{1}{2}U^2\,\text{Im}\left\{\frac{1}{\underline{X}_d\,(j\,s)}-\frac{1}{\underline{X}_q\,(j\,s)}\right\}\cos 2\,(\omega\,st-\vartheta_0) \quad (4)$$
$$-\frac{1}{2}U^2\,\text{Re}\left\{\frac{1}{\underline{X}_d\,(j\,s)}-\frac{1}{\underline{X}_q\,(j\,s)}\right\}\cos 2\,(\omega\,st-\vartheta_0)$$

mit den komplexen Reaktanzoperatoren

$$\frac{1}{\underline{X}_d\,(j\,s)} = \left(\frac{1}{X_d}+\left(\frac{1}{X_{d'}}-\frac{1}{X_d}\right)\frac{j\,sT_{d'}}{1+j\,sT_{d'}}\right.$$
$$\left.+\left(\frac{1}{X_{d''}}-\frac{1}{X_{d'}}\right)\frac{j\,sT_{d''}}{1+j\,sT_{d''}}\right)$$
$$\frac{1}{\underline{X}_q\,(j\,s)} = \frac{1}{X_q}+\left(\frac{1}{X_{q''}}-\frac{1}{X_q}\right)\frac{j\,sT_{q''}}{1+j\,sT_{q''}}. \quad (5)$$

Das dynamische Verhalten der Synchronmaschine beim Übergang in den Asynchronbetrieb wurde mit Hilfe digitaler Simulation untersucht. Dabei kam als Grundmodell das bekannte Zweimaschinenproblem zur Anwendung. Die Darstellung der Synchronmaschine erfolgte in den Achsengleichungen nach *Park* (Modell 5. Ordnung). Im Ausgangszustand arbeitet die Maschine im Nennbetrieb. Durch Ausschalten der Erregung wurde der Übergang in den Asynchronbetrieb eingeleitet.
In den Bildern 1 und 2 ist der Verlauf des Ständerstroms und der Winkelgeschwindigkeit eines 220-MW-Generators während des Übergangs in den Asynchronbetrieb dargestellt. Nach dem Ausschalten der Erregung wurde die mechanische Antriebsleistung der Turbine um 50% gesenkt und die Erregerwicklung über ver-

Bild 1. Verlauf des Ständerstroms eines 220-MW-Generators während des Übergangs in den Asynchronbetrieb mit unterschiedlichen Zusatzwiderständen zum Kurzschließen der Erregerwicklung ($P = 0{,}5\ P_n$)



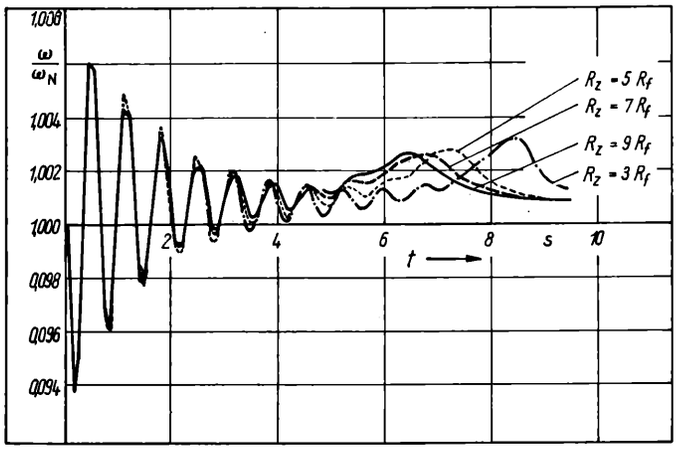


Bild 2. Verlauf der Winkelgeschwindigkeit eines 220-MW-Generators während des Übergangs in den Asynchronbetrieb mit unterschiedlichen Zusatzwiderständen zum Kurzschließen der Erregerwicklung ($P = 0{,}5\ P_n$)

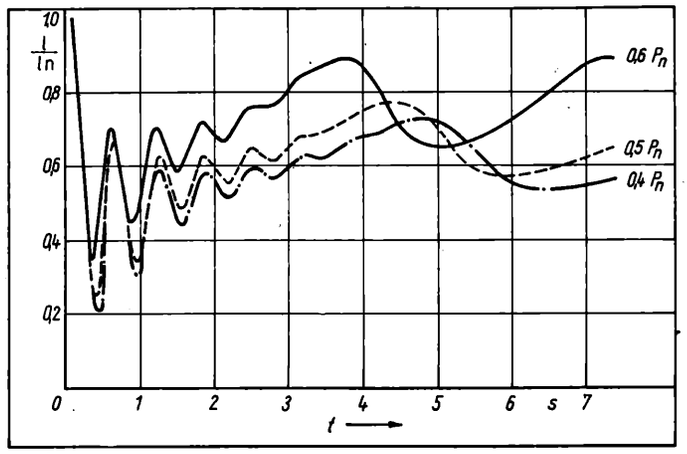


Bild 3. Verlauf des Ständerstroms eines 500-MW-Generators während des Übergangs in den Asynchronbetrieb und unterschiedlicher Leistungseinsenkung ($R_z = 7\ R_{fd}$)

schiedene Zusatzwiderstände (R_z) kurzgeschlossen. Es ist zu verzeichnen, daß die Amplituden der schwingenden Systemgrößen mit steigendem Zusatzwiderstand sinken. Die Bilder 3 und 4 zeigen den Verlauf des Ständerstroms und der Winkelgeschwindigkeit eines 500-MW-Generators beim Übergang in den Asynchronbetrieb. Nach Ausschalten der Erregung wurde die Erregerwicklung über einen Zusatzwiderstand $R_z = 7\ R_{fd}$ kurzgeschlossen und die Antriebsleistung um 40, 50 bzw. 60 % reduziert. Aus dem Verlauf des Effektivwertes des schwingenden Ständerstroms ist zu erkennen, daß die maximalen Amplituden unter dem Nennstrom liegen und somit keine thermische Überlastung der Ständerwicklung zu erwarten ist. Die Mittelwerte des Schlupfes sind kleiner 0,1 %.

1.2. Thermische Beanspruchung

Eine der wesentlichen Erscheinungen, die beim Asynchronbetrieb der Synchronmaschine beobachtet werden, ist die erhöhte thermische Belastung. In Versuchen [3] konnten mit Hilfe von Wärmemessungen die kritischen Erwärmungsorte sehr genau festgestellt werden. Ziel dieser Betrachtung soll es sein, aufzuzeigen, worin das Besondere der thermischen Beanspruchung besteht, wie sie hervorgerufen wird, und wie sie sich in die Gesamtproblematik des erregungslosen Betriebes einordnet. Die nachfolgenden Aussagen beziehen sich auf die kritischen Erwärmungsbereiche des Turbogenerators. Darunter sind solche Bereiche der Synchronmaschine zu verstehen, deren thermisches Verhalten direkt die Funktion und letztlich die Lebensdauer der Maschine beeinflußt. Das sind Ständerwicklung, Ständerstirnbereich sowie Teile des Rotors.

1.2.1. Erwärmung des Ständers

Es werden nachfolgend die kritischen Erwärmungsorte des Ständers eingehender analysiert. Dabei sind die Erwärmungsvorgänge, wie sie in der Ständerwicklung bzw. im Ständerstirnbereich auftreten, nicht losgelöst voneinander zu betrachten, da sie unmittelbar miteinander verknüpft sind.

— Erwärmung der Ständerwicklung

Auf Grund der beim Asynchronbetrieb erforderlichen Blindleistungsentnahme aus dem Netz kann bei gleichzeitiger Wirkleistungsübertragung nahe der Nennleistung der Mittelwert des Ständerstroms den zulässigen Wert übersteigen. Erforderlich wäre jedoch, den Mittelwert des Ständerstroms auf 1,0 ··· 1,1 des Nennwerts zu begrenzen, um das Wicklungsmaterial und letztlich die Isolation nicht über Gebühr zu beanspruchen [2].

In Abhängigkeit von den verwendeten Isolationsmaterialien sind unterschiedliche thermische Grenzwerte zulässig, die bei der Betrachtung des jeweiligen Generatortyps unbedingt Berücksichtigung finden müssen. Mit einer schnellen Senkung der Generatorwirkleistung läßt sich die Bedingung der Ständerstrombegrenzung erfüllen und eine Gefährdung der Ständerwicklung weitestgehend vermeiden. Diese Tatsache wurde in Auswertung der Meßergebnisse in [5] bekräftigt. Die Blindleistungsaufnahme hängt nicht allein von der eingespeisten Wirkleistung ab, sondern ist auch eng mit dem Wert der Generatorklemmenspannung verknüpft. Meßergebnisse haben das bestätigt und gezeigt, daß bei einer Erhöhung der Generatorspannung und konstant bleibender Scheinleistung

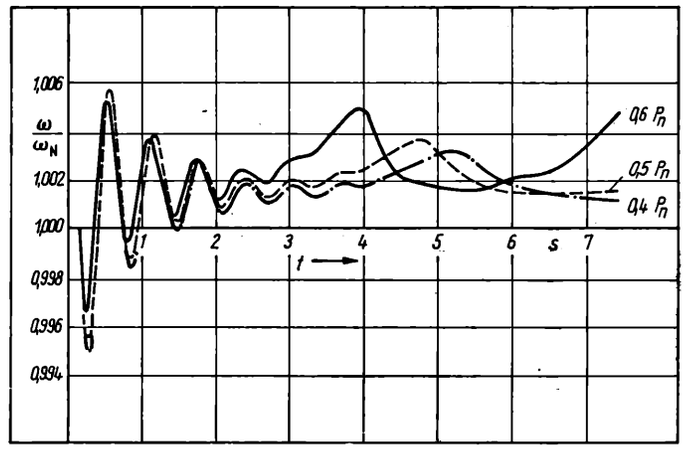


Bild 4. Verlauf der Winkelgeschwindigkeit eines 500-MW-Generators während des Übergangs in den Asynchronbetrieb und unterschiedlicher Leistungssenkung ($R_z = 7\ R_{fd}$)

die gemessenen Temperaturen generell sinken, da der Strom ebenfalls geringer wird [3]. Des weiteren muß bei der Betrachtung der Ständerwicklung die Tatsache beachtet werden, daß über den Umfang des Ständerblechpakets Temperaturunterschiede auftreten können, insbesondere im Bereich des Strangwechsels. So liegt die zu erwartende Temperatur im Strangwechselbereich eindeutig über denen in der Strangmitte, jedoch nehmen sie nach eingehenden Untersuchungen keine extremen Werte an.

Generell muß mit der Betrachtung der Ständerwicklung immer eine Einschätzung der Lebensdauerverminderung der Ständerwicklungsisolation verbunden sein. Im Hinblick auf die geforderte hohe Lebensdauer von Generatoren ist es außerordentlich wichtig, die thermischen Grenzwerte unbedingt einzuhalten, denn nach dem Gesetz von *Monsinger* würde bereits eine Erhöhung der Wicklungstemperatur um 8 K über die vom Hersteller zugelassene Grenztemperatur eine Halbierung der Normlebensdauer zur Folge haben [3]. Im übererregten synchronen Betrieb bestimmt die Erwärmung des Wicklungsmaterials vorrangig die Lebensdauer der Isolation, da die angrenzenden Blechpakete niedrigere Temperaturen haben. Im Asynchronbetrieb können sich diese Verhältnisse umkehren, so daß dann die Temperatur der Endpakete in unmittelbarer Nähe der Stabisolation die Lebensdauer bestimmt. Damit wird die Wicklungsisolation mit der Temperatur der ersten Blechpakete beansprucht. Geht man ferner von der Annahme aus, daß die Druckfinger massiv ausgeführt sind und infolge ihrer guten Leitfähigkeit über die gesamte Druckfingerhöhe die gleiche Temperatur herrscht, so können die Wirbelströme in diesem Bereich zu einer thermischen Überbeanspruchung führen.

— Erwärmung der Blechpakete im Ständerstirnbereich

Es hat sich herauskristallisiert, daß der Ständerstirnbereich unter dem Blickwinkel der thermischen Beanspruchung ein überaus gefährdeter Bereich ist. Dazu zählen insbesondere die letzten drei

Endpakete des Ständers, die Druckfinger, der Druckring sowie die metallischen Bauteile zur Wickelkopfversteifung. Die physikalischen Ursachen für die erhöhte Erwärmung, speziell in diesem Bereich, sind auf eine veränderte Phasenlage zwischen Ständer- und Läuferfeld während des Asynchronbetriebes zurückzuführen. Die Überlagerung ergibt eine vom übererregten Synchronbetrieb stark abweichende Feldverteilung im Stirnbereich des Generatorständers. Es ändert sich die axiale Feldkomponente im Sinne einer Induktionserhöhung. Ergebnis ist eine Flußdichtekonzentration im Endzonenbereich des Blechpakets sowie der angrenzenden Bauteile. Weiterhin ruft die Verlagerung des magnetischen Flusses im Generatorständer zusätzliche Wirbelstromverluste hervor, die eine höhere Erwärmung der betreffenden Bauteile zur Folge haben. Die Auswirkungen auf die resultierende Feldverteilung unter Berücksichtigung der drei Flußkomponenten (axial, radial, tangential) lassen sich demnach folgendermaßen deuten:

Durch die Anordnung des Wickelkopfes tritt im Induktorwickelkopffeld nur eine axial wirksame und eine tangential wirksame Feldkomponente auf. Dabei ist die tangentiale Komponente verhältnismäßig klein gegenüber der axialen. Diese Tatsache, gepaart mit der Erkenntnis, daß ein gleichgerichtetes Ständer- und Läuferfeld eine Verlagerung des magnetischen Feldes (besonders der axialen Komponente) in Richtung Maschinenmitte bewirkt, gibt Aufschluß über die Flußerhöhung sowie über die in diesem Zusammenhang hervorgerufenen Wirbelströme. Daraus läßt sich schlußfolgern, daß sich während des Asynchronbetriebs eine Feldverteilung ergeben wird, die mit der bei extremer Untererregung vergleichbar ist. Gestützt auf praktische Messungen und Analysen in [3] und [4] wurde die Erkenntnis gewonnen, daß als kritische Bauteile hinsichtlich thermischer Beanspruchung der Druckring, die Druckfinger und die ersten drei Blechpakete zu betrachten sind. Dabei haben Untersuchungen an verschiedenen Generatoren gezeigt, daß einerseits am unteren Ende des Druckfingers die höchsten gemessenen Temperaturen auftraten, und sowohl die Temperatur des Druckringes und der Endpakete darunter lagen, aber andererseits auch Meßreihen gewonnen wurden, bei denen im Druckring eindeutig die höchsten Erwärmungen auftraten. Ursache dafür ist die unterschiedliche Wickelkopfgeometrie der Versuchsgeneratoren. Die teilweise widersprüchlichen Ergebnisse bezüglich des gefährdetsten Bereichs bzw. der Reihenfolge der leistungsbegrenzenden Faktoren beim Asynchronbetrieb von Turbogeneratoren sind bedingt durch die Unterschiede der

- geometrischen Abmessungen des Ständers bzw. des Induktorwickelkopfes
- Wicklungsarten
- Wickelkopfneigungen
- Wickelkopfauslagerungen
- Nutenzahlen
- örtliche Lage der anderen metallischen Bauteile in diesem Bereich [3].

1.2.2. Erwärmung des Läufers

Für die exakte Ermittlung der Läuferverluste gilt sinngemäß dasselbe wie im vorhergehenden Abschnitt. Man unterscheidet zwei verschiedene Erscheinungen in Abhängigkeit vom Zustand des Läuferkreises. So kann der Erregerkreis während des Asynchronbetriebes offen oder geschlossen sein, wobei die Erscheinungen des offenen Kreises theoretisch einfacher zu handhaben sind, da man annehmen kann, daß die Generatorparameter der Längs- und Querachse annähernd gleich sind.

Bei vollständig offener Erregerwicklung wird der Läufer aus der Sicht der Wärmebeanspruchung sehr stark belastet. Die vom Ständerfeld induzierten Ströme schließen sich über die Kappen des Läufers und die Nutenkeile, wo ihnen der größte Widerstand entgegengebracht wird. Örtliche Überhitzungen am Kappensitz sind denkbar, doch sind moderne Generatoren so konstruiert, daß dieses Problem praktisch nicht relevant ist [2].

Die Auswertung praktischer Versuche und theoretischer Simulationen ergaben bei offener Erregerwicklung die kleinsten Pendelamplituden der Leistung und der Ströme, obwohl die Werte des Schlupfes und der im Rotor induzierten Wechselspannung größer waren als bei geschlossener Erregerwicklung.

Im Gegensatz dazu treten bei geschlossenem Läuferkreis auf Grund der elektrischen und magnetischen Unsymmetrie des Polsystems zeitlich veränderliche Werte der Wirkleistung, des Schlupfes sowie anderer elektrischer Größen auf, die sich periodisch zwischen Minimal- und Maximalwerten bewegen. Die Besonderheit hierbei ist, daß die Asynchroncharakteristik [$M_{el} = f(s)$] steiler verläuft, demzufolge liegen die Schlupfwerte unter denen bei offener Läuferwicklung. Da die thermischen Zeitkonstanten sehr groß gegenüber den elektrischen sind, ist es zulässig und auch zweckmäßig, bei Berechnungen mit den entsprechenden Mittelwerten zu arbeiten. Die größten Erwärmungen des Läufers wurden nicht an den Enden, sondern in der Rotormitte festgestellt. Ursache ist die Wirbelstromverteilung bei derart kleinen Schlupffrequenzen, weil sie sich infolge der großen Eindringtiefe der in den Zähnen induzierten Wirbelströme über das Läufereisen schließen [1]. Nur nach Überschreitung einer gewissen Leistungsgrenze, die in Abhängigkeit von der Ausführung der Maschine, deren Asynchroncharakteristik dann flacher verläuft, und von den Netzverhältnissen (eingesenkte Klemmenspannung), wächst der Schlupf sehr stark an und erreicht den Kippschlupf. Das ist beim Übergang in den Asynchronbetrieb durch eine rasche und unverzügliche Einsenkung der Turbinenleistung zu verhindern, um in einen Bereich kleiner Schlupfwerte zu gelangen. Die Läuferverluste liegen bei kleinen mittleren Schlupfwerten ($< 1\,\%$) im ungefährlichen Bereich und betragen bei sehr kleinen Schlupfwerten ($< 0{,}1\,\%$), wie sie im quasistationären Asynchronbetrieb zu erwarten sind, nur einige Prozent der Verlustleistung im Läufer bei Nennerregung. Diese geringfügigen Verluste können in einem richtig konzipierten Läufer praktisch keinen Schaden verursachen. Die gemessenen Temperaturen nahmen keine gefährlichen Werte an und können im Prinzip nicht als entscheidende beschränkende Größe betrachtet werden. Ein Ansatz zur Quantifizierung der thermischen Beanspruchung der genannten Bauteile des Turbogenerators wird in [7] angegeben.

2. Zusammenfassung

Als zulässige asynchrone Betriebszustände können nur Regime ohne Erregung betrachtet werden. Erregte asynchrone Fahrweisen haben hohe elektrische und mechanische Beanspruchungen zur Folge, was mit einer erheblichen Einschränkung der Lebensdauer verbunden ist. Da die Synchronmaschine im Asynchronbetrieb ihre zur Magnetisierung notwendige Blindleistung aus dem EES bezieht, ist mit einem starken Ansteigen des Ständerstroms zu rechnen. Um dem entgegenzuwirken, muß die mechanische Antriebsleistung um etwa 40 bis 50 % reduziert werden.

Im asynchronen Betrieb treten Schwingungen der Systemgrößen der Synchronmaschine auf. Sie werden durch die Unsymmetrie des Läufers hervorgerufen. Eine Minimierung ist durch das Kurzschliessen der Erregerwicklung möglich. Theoretische Berechnungen haben ergeben, daß dazu ein Zusatzwiderstand der Größenordnung $R_z = 7 R_{fd}$ sinnvoll ist.

Mit dem Kurzschließen der Erregerwicklung wird gleichzeitig ein Schutz der Erregerwicklung vor Überspannungen realisiert, die durch das Ständerfeld im Läufer induziert werden.

Während des asynchronen Betriebes treten erhöhte thermische Beanspruchungen der einzelnen Bauteile und Baugruppen der Synchronmaschine auf. Die physikalischen Ursachen der Erwärmung wurden analysiert und Ergebnisse praktischer Messungen ausgewertet. Im Leistungsbereich unter 60 % der Nennleistung sind keine thermischen Überlastungen zu erwarten.

Literatur

[1] *Canay, M.:* Beitrag über den Asynchronbetrieb von Turbogeneratoren. Bull. SEV 61 (1970) 25, S. 1191–1198

[2] *Zielinski, Z.:* Der Betrieb der Synchrongeneratoren ohne Erregung-Asynchronbetrieb der 235-MVA-Generatoren TYPE TGW-200 (2. Teil). IfK-Informationen (1969) 25, S. 45–57

[3] *Volkmann, E.:* Untererregter Betrieb von Turbogeneratoren unter besonderer Berücksichtigung des 100-MW-Generators. IfK-Informationen (1973) 63, S. 37 bis 50

[4] *Wagner, W.:* Festlegung der Grenzen für den untererregten Betrieb von Turbogeneratoren. ELEKTRIE, Berlin 27 (1973) 9, S. 470–473

[5] *Skokan, V.:* Der 137,5-MVA-Turbogenerator SKODA im untererregten und asynchronen Lauf. IfK-Informationen (1973) 63, S. 23–34

[6] *Chutorezkij, G. M.:* Teplowye orgranitschenija pri rabote motzschnych turbogeneratorow w asinchronnom reschime. Elektrischestwo (1986) 11, S. 50–52

[7] *Krause, M.:* Asynchronlauf von Turbogeneratoren. Wiss. Berichte IH Zittau 23 (1987), S. 15–20

EA 5892

Einfluß der Bürstenqualität auf das Betriebsverhalten von batteriegespeisten Gleichstrommaschinen

D. Oesingmann; B. Morgenfrüh; Ilmenau

In den Veröffentlichungen [1] und [2] wird auf Besonderheiten des Betriebsverhaltens von Gleichstromnebenschlußmaschinen hingewiesen, die mit der Bemessung des magnetischen Kreises und der Wicklungsauslegung zusammenhängen. Ein weiteres Funktionselement der Gleichstrommaschine, das wesentlichen Einfluß auf die Drehzahl-(n)-Drehmomenten-(M)-Kennlinie ausübt, ist das Kontaktsystem Bürste — Kommutator. Der Konstrukteur hat bei der Auswahl des Kommutators bezüglich der geometrischen Abmessungen und der Lamellenzahl Entscheidungsmöglichkeiten, während er das verwendete Material und die prinzipielle Konstruktion des Kommutators als gegeben hinnehmen muß.

Treten Probleme beim Betrieb der Gleichstrommaschine auf, die auf das System Bürste — Kommutator zurückzuführen sind, werden der Bürstendruck, die Kontaktierung der Bürste mit den Zuleitungen zur Spannungsquelle und die Bürstenqualität verändert. Dabei geht es vorrangig um die Einhaltung von Funkstörgrenzen und um die Lebensdauer der Bürsten. Der Einfluß des Bürstenspannungsabfalls auf den elektromechanischen Energieumsatz ist durch eine entsprechend angepaßte Auslegung der elektromagnetisch aktiven Teile korrigierbar.

Bei Kommutatormaschinen mit kleinen Klemmenspannungen (1,5 bis 24 V) werden zur Reduzierung des Bürstenspannungsabfalls weiche Kohlebürsten oder metallhaltige Bürsten mit Erfolg eingesetzt. Ihr Nachteil liegt hauptsächlich in der geringen Lebensdauer, der dann keine Rolle spielt, wenn die veranschlagte Lebensdauer der rotierenden Maschine geringer ist als die der Bürste. Bei größeren Laufzeiten werden härtere Bürstenqualitäten mit höheren Bürstenspannungsabfällen eingesetzt, um die Überprüfung und das Auswechseln der Bürsten nicht in die Wartungsarbeiten einbeziehen zu müssen.

Solange die Gleichstrommaschine nur als Generator oder nur als Motor verwendet wird, bedeutet diese Maßnahme eine Erhöhung der Verluste, die man bei der Auslegung berücksichtigt. Wird aber, z. B. in einem batteriebetriebenen Fahrzeug, sowohl der Generator- als auch der Motorbetrieb verlangt, dann kann eine zu harte Bürste ein völlig unzureichendes Betriebsverhalten des Antriebs bewirken. Aus diesem Grund erscheint es wichtig, daß sowohl die Produzenten als auch die Betreiber solcher Antriebe das Verhalten der Gleichstrommaschine mit unterschiedlichen Bürstenqualitäten beachten. Da dieser Fall vorrangig bei Maschinen mit Batteriespeisung auftritt, wird in den folgenden Ausführungen der Anschluß der Gleichstrom-Nebenschlußmaschine an eine 24-V-Batterie vorausgesetzt.

1. Vergleich des Betriebsverhaltens der Gleichstrom-Nebenschlußmaschine am starren Netz und an einer Batterie

Betrachtet man die Batterie (Bleiakkumulator) als eine Energiequelle mit konstanter Spannung, dann hat die Gleichstrom-Nebenschlußmaschine im hier interessierenden Arbeitsbereich das typische Nebenschlußverhalten (Bild 1, Kurve 1). Im praktischen Betrieb sinkt die Batteriespannung U_B bei der Energieabgabe und vergrößert sich im Ladebetrieb. Damit wird im Vergleich zur Annahme U = konst. die n-M-Kennlinie im Motorbetrieb steiler (Bild 1, Kurve 2). Da beim Ladevorgang die Batteriespannung stärker steigt als sie bei gleichen Strombeträgen während des Entladens sinkt, ergibt sich für die Gleichstrommaschine im Generatorbetrieb ein noch größerer Anstieg $\mathrm{d}n/\mathrm{d}M$, so daß die n-M-Kennlinie bei $I_A = 0$ einen Knick hat. Die quantitativen Anstiege beider Geraden sind in gewissen Grenzen vom Ladezustand der Batterie abhängig.

Dr. sc. techn. *Dieter Oesingmann* ist wiss. Oberassistent, Ing. *Bernd Morgenfrüh* ist Ingenieur für Lehre und Forschung an der Sektion Elektrotechnik der TH Ilmenau.

Bild 1
Drehzahl-Drehmoment-Kennlinien einer Gleichstromnebenschlußmaschine am starren Netz und mit Batteriespeisung

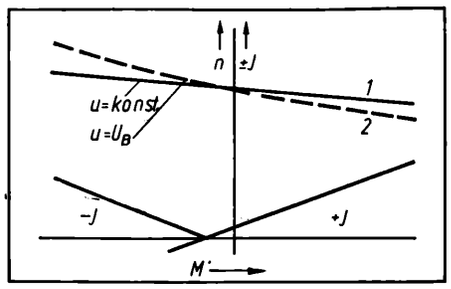
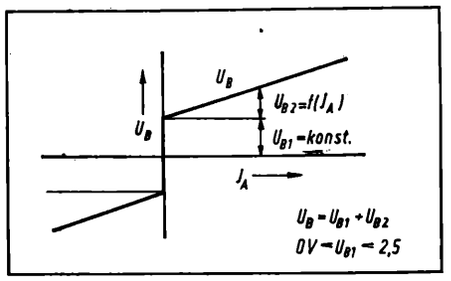


Bild 2
Idealisierter Spannungsabfall am Kontaktsystem Bürste — Kommutator



2. Berücksichtigung des Bürstenspannungsabfalls bei der n-M-Kennlinie

Ohne auf die einzelnen Spannungsabfälle des Kontaktsystems zwischen der Zuleitung von der Energiequelle und den Kommutatorlamellen einzugehen, kann man den Bürstenspannungsabfall vereinfacht als die Summe aus einem konstanten und einem stromabhängigen Anteil ansehen (Bild 2), wobei der konstante Anteil mit der Änderung der Stromrichtung sein Vorzeichen ändert. Die stromabhängige Komponente des Bürstenspannungsabfalls wirkt sich auf den Anstieg der n-M-Kennlinie aus, während der konstante Anteil mit seinem doppelten Betrag einen Sprung in der n-M-Kennlinie beim Stromnulldurchgang verursacht (Bild 3). In dieser Weise idealisiert läßt sich der Bürstenspannungsabfall an der realen Gleichstrommaschine nicht nachweisen. Wie der ausgezogene Kurvenverlauf im Bild 3 zeigt, hat die n-M-Kennlinie der Gleichstrommaschine mit harten Bürsten im Bereich kleiner Ströme ein stark abweichendes Verhalten von dem linearen Verlauf, der in diesem Fall mit einem Spannungssprung von etwa 5 V vergleichbar und mit einer Drehzahländerung von 28 % bezogen auf die Nenndrehzahl verbunden ist.

3. Maßnahmen zur Linearisierung der n-M-Kennlinie

Einfluß auf die Höhe des Drehzahlsprungs in der n-M-Kennlinie haben alle Parameter, die am Stromübergang von der Zuleitung bis zum Kommutator beteiligt sind. In experimentellen Untersuchungen erwiesen sich der Spannungsabfall vom Bürstenhalter zur Bürste und die Bürstenqualität als Hauptursachen des nichtlinearen Verhaltens der Gleichstrommaschine.

Die n-M-Kennlinie im Bild 4, Kurve 1, gilt für Köcherbürstenhalter mit angelöteter Zuleitung, so daß der Strom über einen Kontaktteller und der Armierung zur Bürste geleitet wird. Eine direkte Lötverbindung der Zuleitung mit der Armierung ergab einen um 17 % kleineren Drehzahlsprung (Bild 4, Kurve 2), der sich zu gleichen Teilen auf den Motor- und den Generatorbetrieb auswirkt.

Die nahezu vollständige Aufhebung des Drehzahlsprungs bewirkt der Ersatz der harten Kohlebürste durch eine weiche. Das bedeutet eine Drehzahlerhöhung im Motorbetrieb um $\Delta n_M = 0{,}15\, n_N$ und eine Senkung im Generatorbetrieb um praktisch den gleichen Betrag (Bild 4, Kurve 3).

4. Bedeutung des Drehzahlsprungs für das Betriebsverhalten im Anwendungsfall

Im Motorbetrieb wird durch den Einsatz der weichen Bürstensorte eine Wirkungsgradänderung um 14 % möglich, was für ein Batteriefahrzeug mit der Erhöhung des Aktionsradius verbunden ist.

Wichtiger ist das Verhalten beim Übergang zum Generatorbetrieb. Hier wird eine Bremswirkung erwartet, wenn das Fahrzeug zur Talfahrt übergeht. Sie tritt bei harten Kohlebürsten erst nach einer beachtlichen Geschwindigkeitszunahme nennenswert in Erscheinung, die aber schon über der höchstzulässigen liegen kann. Demzufolge ist eine Gleichstrommaschine mit harten Kohlebürsten für

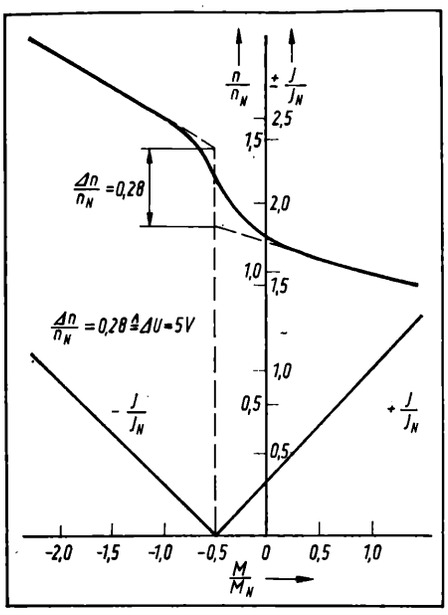


Bild 3
Strom und Drehzahl einer Gleichstromnebenschlußmaschine mit harten Kohlebürsten als Funktion des Drehmoments

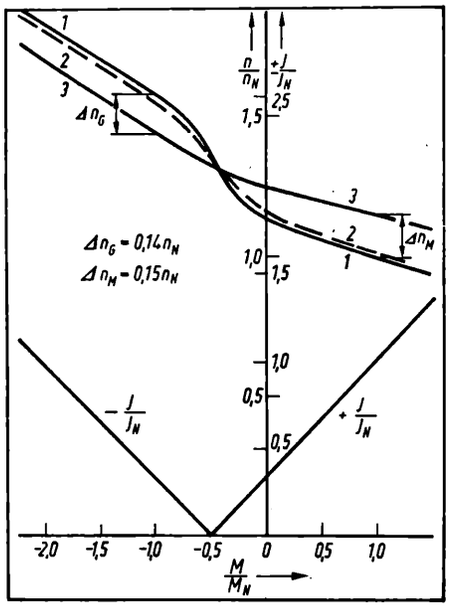


Bild 4
Gegenüberstellung der n-M-Kennlinien mit veränderten Parametern am Kontaktsystem

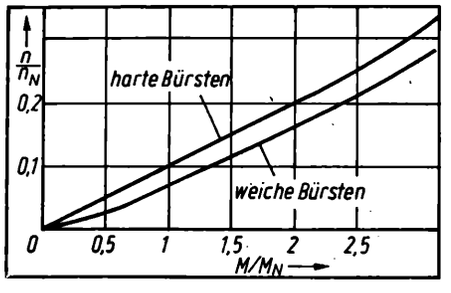


Bild 5
Drehzahl als Funktion vom Drehmoment im Kurzschluß mit unterschiedlichen Bürstensorten

solche Anwendungsfälle nicht einsetzbar. Der Betreiber eines Fahrzeugs mit Gleichstromantrieb muß eindringlich darauf hingewiesen werden, beim Auswechseln der Bürsten unbedingt die vom Produzenten vorgeschriebene Bürstenqualität einzusetzen, weil sich im anderen Fall ein ungewohntes Betriebsverhalten des Fahrzeugs einstellt.

Betrachtet man den Kurzschluß der Gleichstrommaschine (Bild 5), der zur Bremsung bei kleinen Drehzahlen genutzt wird, dann ergeben sich bei gleichen Drehzahlen in Abhängigkeit von der Bürstenqualität unterschiedliche Bremsdrehmomente, d.h., die Bremsung ist mit weicheren Kohlebürsten wirkungsvoller.

5. Konsequenzen für die Auslegung

Wird eine Gleichstromnebenschlußmaschine für einen Anwendungsfall ausgelegt, bei dem sowohl der Motor- als auch der Generatorbetrieb zum Arbeitsbereich gehören, muß der Anwender Forderungen zum Verlauf der n-M-Kennlinie im gesamten Betriebsbereich formulieren, die den zulässigen Drehzahlsprung beim Übergang von einer zur anderen Betriebsart enthalten. Hierauf sind die Forderungen bezüglich der Lebensdauer der Bürsten abzustimmen, da zwischen den technischen Möglichkeiten und den idealen Verhältnissen für den Anwendungsfall Kompromisse geschlossen werden müssen.

Aufgrund der vorliegenden Untersuchungen erscheint es ratsam, das Auswechseln bzw. die Kontrolle der Bürsten in das Wartungs- und Pflegeprogramm der Gleichstrommaschine einzubeziehen. Dazu ist die Motorkonstruktion so zu gestalten, daß diese Arbeit leicht durchführbar ist.

6. Zusammenfassung

Die Beobachtung des Betriebsverhaltens der Gleichstromnebenschlußmaschine mit unterschiedlichen Bürstenqualitäten bei kleinen Spannungen zeigt, daß die Bürstenqualität nicht nur die energetischen Parameter und die Lebensdauer beeinflußt, sondern auch die Linearität der n-M-Kennlinie beim Übergang vom Motor- zum Generatorbetrieb beeinträchtigt. Dadurch kann die Eignung einer Maschine für einen Anwendungsfall in Frage gestellt werden. Darüber hinaus wird auf die Gefahr hingewiesen, wenn der Betreiber eines solchen Antriebs nicht von den Folgen unterrichtet ist, die die Verwendung falscher Bürstensorten nach sich zieht.

Literatur

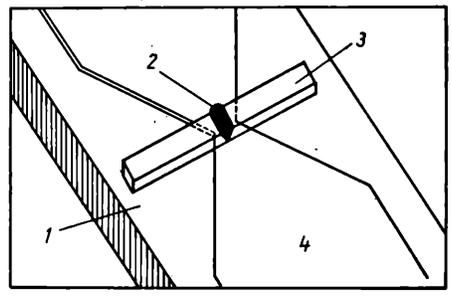
[1] *Oesingmann, D.; Morgenfrüh, B.:* Gesichtspunkte für die Auslegung der Erregerwicklung zweipoliger Gleichstrommaschinen. ELEKTRIE, Berlin 41 (1987) 7, S. 254 u. 255

[2] *Vogt, K.:* Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie konstant erregter Gleichstrom-Kleinstmotoren. ELEKTRIE, Berlin 41 (1987) 9, S. 347 u. 348

EA 5852

Leistungsfähiges Josephson-Element auf Keramikbasis

Ein Josephson-Element auf der Basis einer supraleitenden Keramik in einer neuartigen Konstruktion wurde in Japan entwickelt. Das neue Bauelement zeichnet sich nicht nur durch eine hohe Leistungsfähigkeit aus, es läßt sich auch relativ einfach herstellen. Das Josephson-Element basiert auf einem Siliciumsubstrat (1), auf dem sich ein supraleitender Dünnfilm (4) befindet. Dieser Dünnfilm ist an einer Stelle bis auf einen dünnen Steg eingeengt, der aber noch so breit ist, daß er technologisch beherrscht wird. Dieser Steg wird von einem Tantalheizer (3) gekreuzt, der in der Stegmitte so geformt ist, daß zwischen ihm und dem supraleitenden Film eine Art Tunnel (2) bleibt.



Das Josephson-Element wird auf die Temperatur von flüssigem Stickstoff abgekühlt, bei der der Dünnfilm supraleitend ist. Wird ein Strom durch den Tantalheizer geschickt, erwärmt er die beiden Ränder des Steges über die kritische Temperatur, so daß nur noch in der Stegmitte ein supraleitender Kanal von etwa 0,1 µm Breite bleibt. Durch Verändern des Stromes durch den Tantalheizer kann die supraleitende Kanalbreite im Steg gesteuert werden.

Damit lassen sich Schaltelemente realisieren, ohne supraleitende Strukturen im Submikronbereich direkt herstellen zu müssen. (IB WT/EL)

EA 2816

„Kurzschluß des Ankerkreises" und neue Vergleichskriterien, bei der Untersuchung des Kommutierungsverhaltens

F. Veselka, Brno, ČSSR

Verwendete Formelzeichen

C1 bis C3	Spulensonden
l_{Fe}	Länge des Massiveisens (in Richtung der Feldlinien)
M1 bis M3	Modellmaschinen
n	Drehzahl
I_a	Ankerstrom
P	Leistung
U_n	Nennspannung
Φ_δ	Magnetfluß im Luftspalt
ξ_0	Faktor
μ	Permeabilität

Die Anwendung von Gleichstrommaschinen in geregelten Antrieben ist mit der Gewährleistung guter Kommutierungseigenschaften der Maschinen bei schnellen Ankerstromänderungen verbunden. Während der Übergangsvorgänge kommt es zur Verzögerung des Magnetflusses und zu einer Störung der ordnungsgemäßen Funktion der Wendepols. Durch die bisherige Forschung wurde ermittelt [1] [2], daß die Kommutierungsqualität vom Aufbau des Magnetkreises abhängt.

1. Bedeutung der Methode „Kurzschluß des Ankerkreises" bei der Untersuchung der Verzögerung des Magnetflusses in der Querachse von Gleichstrommaschinen

Die Beobachtung der Reaktion des Magnetflusses bei Strom- oder Spannungssprüngen [1] [3], Bild 1a), und die Interpretation der experimentellen Ergebnisse sind dadurch erschwert, daß der Verlauf des Übergangsvorgangs sowohl durch elektromechanische als auch elektromagnetische Übergangsvorgänge beim Anschluß des Gleichstromerzeugers an den Ankerkreis beeinflußt wird. Darum wurde für die Untersuchung der Verzögerung des Magnetflusses in der Querachse einer Gleichstrommaschine die Methode „Kurzschluß des Ankerkreises", Bild 2a), angewendet und damit die Wirkung der Stromquelle auf den Verlauf des Übergangsvorgangs beseitigt. Der Kurzschluß des Ankerkreises wurde mit Schützen direkt an den Klemmleisten der Maschine durchgeführt. Durch die im Luftspalt unter dem Wendepol angebrachten Spulensonden, Bild 2b), wurde eine Veränderung $\frac{d\Phi_\delta(t)}{dt}$ in Abhängigkeit vom Aufbau des Magnetkreises festgestellt.

Die Veränderung der Parameter des gesamten Querkreises der Gleichstrommaschine nach Kurzschluß des Ankerkreises verursachte eine Verlangsamung des Übergangsvorgangs, was die Anwendung einer allgemein verfügbaren Meßwerterfassungseinrichtung ermöglichte.

2. Einführung neuer Vergleichskriterien

Der experimentelle Teil der Untersuchung der Verzögerung des Magnetflusses im Zusammenhang mit den Vorgängen im magnetischen Querkreis der Maschine wurde an einer stillstehenden Maschine durchgeführt und die zeitliche Änderung des Magnetflusses in den Spulensonden C1 bis C3, Bild 1b), untersucht. Die Breite der

Bild 1a
Die Interpretation der experimentellen Ergebnisse, die Beobachtung der Reaktion des Magnetflusses bei Strom- oder Spannungssprüngen

Bild 1b
Verlauf der 1. Ableitung des Magnetflusses und die neueingeführten Kriterien

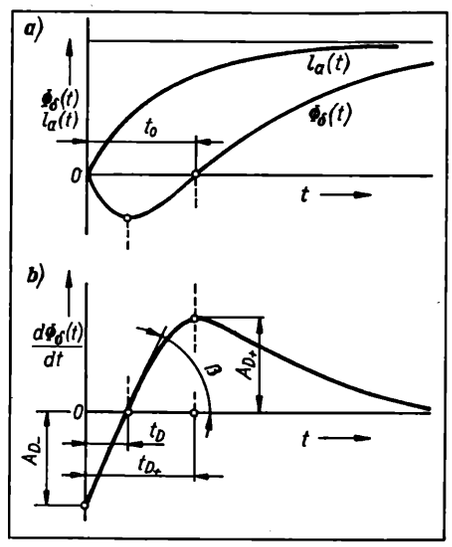
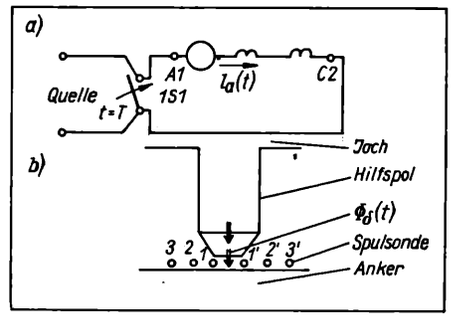


Bild 2a
Schaltbild der Methode „Kurzschluß des Ankerkreises"

Bild 2b
Anbringung von Meßspulen unter dem Wendepol



einzelnen Spulensonden wurde so bemessen, daß anhand der gewonnenen Ergebnisse die Wahl der Meßspule optimiert werden konnte. Aus der Beurteilung des Verlaufs der 1. Ableitung von $\Phi_\delta(t)$ wurden neue Vergleichskriterien A_{D-}; A_{D+}; t_D; t_{D+}; β, Bild 1b), abgeleitet:

A_{D-} Wert $\frac{d\Phi_\delta(t)}{dt}$ im Anfangspunkt, $t = 0$

A_{D+} Wert der 1. Ableitung im Wendepunkt der Kurve $\Phi_\delta(t)$

t_D Lösung für das Kurvenmaximum im Intervall $0 < t < t_0 \left(\frac{d\Phi_\delta(t)}{dt} = 0\right)$

t_{D+} Lösung für den Null(wende)punkt der Kurve $\Phi_\delta(t)$ $(\Phi_\delta(t) = 0)$

Dabei wird angenommen, daß für Maschinen mit der Reihenleistung [MW] $t_0 = t_{D+}$ gilt.

β Anstieg der Funktion $\frac{d\Phi_\delta}{dt}(t)$ im Nulldurchgang.

Diese Vergleichskriterien ermöglichten die Anwendung von modernen Meß- und Berechnungsmethoden. Ihre Einführung ermöglichte eine Zerlegung des Verlaufs der 1. Ableitung des Magnetflusses in die Summe zweier Exponentialfunktionen sowie die Einführung schnellerer und objektiverer Meßmethoden.

3. Meßvorgang und praktische Ergebnisse des experimentellen Teils

In der experimentellen Praxis [4] wurde die Abhängigkeit der Vergleichskriterien vom Ankerstrom I_a und von der Länge der Ersatzfeldlinie in den massiven Teilen des Magnetkreises der Querachse der Maschine festgestellt. Die Messung erfolgte bei drei Stromwerten I_a und bei drei bekannten Längen der Ersatzfeldlinien l_{Fe}, die den Modifikationen des Magnetkreises bei den Maschinen M1 bis M3 entsprechen.

Bei der Messung, Bild 2a), wurde erst durch Erregung der Stromquelle ein Stromwert im Querkreis der Gleichstrommaschine stabilisiert. Dann wurde der Schütz S1 kurzgeschlossen. Durch den Stromimpuls im Augenblick des Kurzschließens wurde ein Schleifenoszillograph des Typs RFT 9 SO-1F3 ausgelöst, der die Übergangsverläufe aufzeichnet.

---

[1]) Dipl.-Ing. *František Veselka*, Kandidat der Wissenschaften, Technische Universität Brno, Fachassistent am Lehrstuhl für elektrische Maschinen und Geräte der elektrotechnischen Fakultät

[2]) Die Arbeiten wurden im Forschungsinstitut für rotierende Maschinen (VUES, Brno) an Modellmaschinen (P = 41 kW, U_n = 320 V, I_a = 128 A, n = 1500 min^{-1}) mit massivem Magnetkreis (M1), lamellierten Wendepolen (M2), vollamellierten Magnetkreis (M3) durchgeführt.

Bild 3. Verläufe $t_D = f(I_a)$ für die Maschinen M1, M2, M3 bei Kurzschluß des Ankerkreises

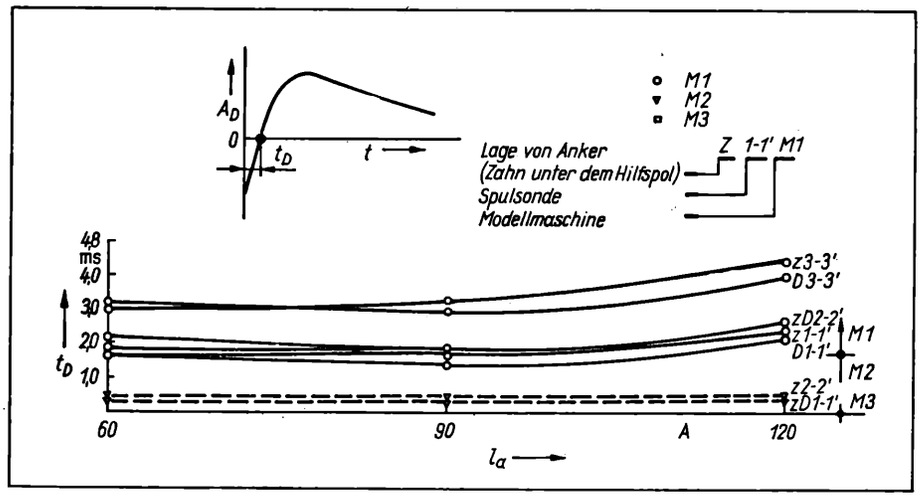


Bild 4. Verläufe $t_{D+} = f(I_a)$ für die Maschinen M1, M2, M3 bei Kurzschluß des Ankerkreises

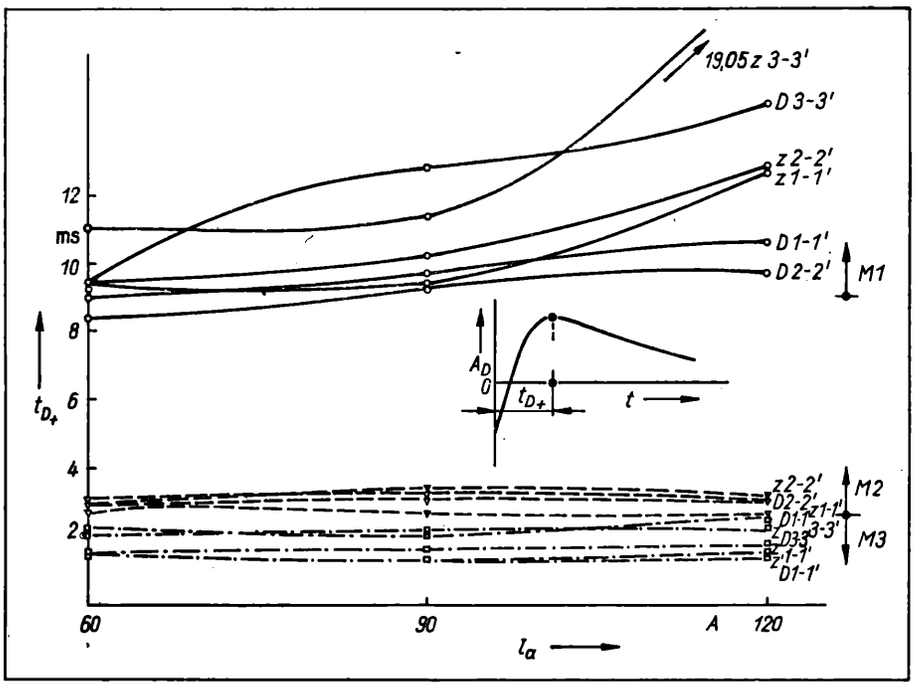
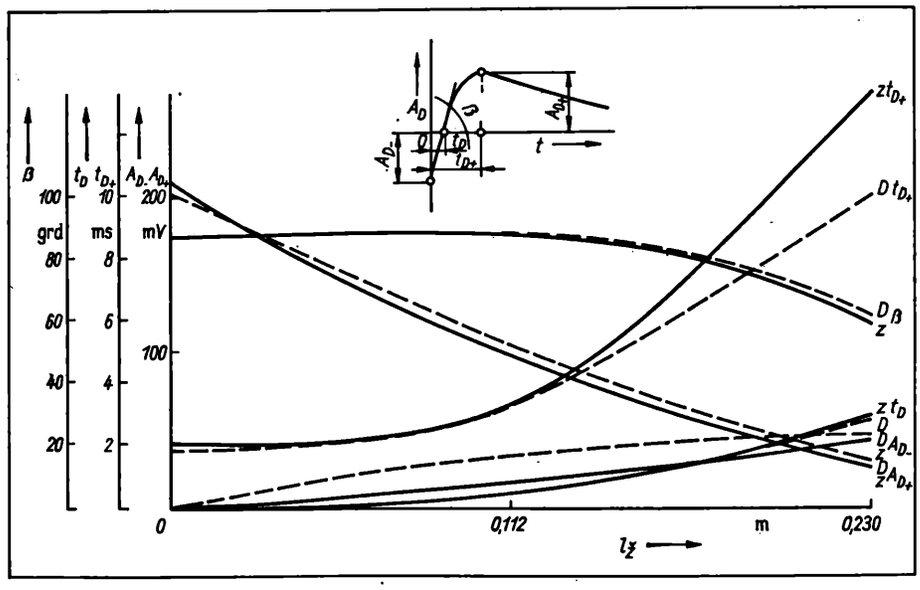


Bild 5. Abhängigkeit der Kenngrößen A_{D-}; A_{D+}; t_D; t_{D+}; β von l_{Fe} mit C2 und $I_a = 120$ A



Werden einige Vereinfachungen in Betracht gezogen (μ = konstant, Messung nur an drei Punkten), kann gefolgert werden, daß sich auch aus diesen Orientierungsverläufen der Abhängigkeit der einzelnen Kriterien auf l_{Fe}, Bilder 3 und 4, interessante Tatsachen ergeben:

— Durch Anwendung der Methode „Kurzschluß des Ankerkreises" wurde der Einfluß der Stromquelle auf den Übergangsverlauf beseitigt

— die Analyse und die Auswertung der 1. Ableitung von $\Phi_\delta(t)$ beschleunigt die Meßwerterfassung und Auswertung und gibt Auskunft über den Einfluß der Länge l_{Fe} auf den Übergangsverlauf

— für die praktische Anwendung zeigte sich die Meßspule C2 als die vorteilhafteste, ihre Breite ist mit der ideellen Breite des Wendepols vergleichbar

Zu Fragen der operativen Prognose der Elektroenergieabnahme von Industrieobjekten

W. P. Kalinchik, Kiew; Chr. Backmann, Leipzig

Fragen der Regimeoptimierung der Elektroenergieabnahme sind gegenwärtig besonders aktuell, wobei die Effektivität ihrer Lösung mit der Einführung der automatisierten Steuerung der Elektroenergieabnahme von Industrieobjekten wächst. Um die Aufgabe der Steuerung der Elektroenergieabnahme zu bewältigen, werden entsprechende technische Mittel benötigt, unter denen in letzter Zeit die Mikrorechentechnik die größte Verbreitung fand. Die Mikrorechentechnik zeichnet sich durch geringe Kosten, Kompaktheit, Flexibilität der Hard- und Software und ausreichende Zuverlässigkeit aus. Die Anwendung der Mikrorechen- und Mikroprozessortechnik zur Steuerung der Elektroenergieabnahme fordert die Entwicklung entsprechender Steuermethoden der Elektroenergieabnahme. Die Analyse der Methoden [1] ergab, daß hauptsächlich Steuermethoden Anwendung finden, die prognostizierte Werte der Elektroenergieabnahme benutzen.
Daraus ist zu erkennen, daß die Steuerung der Elektroenergieabnahme unmittelbar von der Möglichkeit der operativen Prognose der Elektroenergieabnahme in der Etappe der Steuerung abhängt. Das ausgewählte Prognosemodell muß also den Prozeß der Elektroenergieabnahme möglichst präzise beschreiben, muß sich aber andererseits der Prozeßänderung schnell anpassen und zufällige Abweichungen filtern.

1. Prognosemodell

Für die operative Lastprognose werden in [1] die Box-Jenkins-Methode und das stochastische, adaptive Autoregressionsmodell zweiter Ordnung angewendet. Die Realisierung dieser Modelle stellt eine recht komplizierte Rechenoperation dar und ist zur Prognostizierung von Zeitreihen mit langer Vorgeschichte, mindestens 50 Meßwerten, anwendbar. Für Steuersysteme auf der Grundlage von Mikrorechen- und Mikroprozessortechnik entstehen da gewisse Implementierungsprobleme. Breite Anwendung durch ihre Einfachheit fanden Methoden der Exponentialglättung [2] [3].

Kand. d. techn. Wiss. *Wasilij Prokowjewitch Kalinchik* ist Laborleiter des Applikationslabors der Fakultät GEMA am Kiewer Polytechnischen Institut (UdSSR); Dipl.-Ing. *Christian Backmann* ist Lehrer im Hochschuldienst an der Technischen Hochschule Leipzig, Sektion Elektroenergieanlagen.

Die Exponentialglättung einer Reihe wird nach der Rekursionsformel

$$S_t = \alpha\, x_t + \beta\, S_{t-1} \tag{1}$$

mit

S_t Exponentialmittelwert zum Zeitpunkt t,
α Glättungsparameter $0 < \alpha < 1, \beta = 1 - \alpha$,

berechnet.
Bei der Prognose der Elektroenergieabnahme wird von der Annahme ausgegangen, daß die Werte durch das Modell

$$x_t = a_{1,t} + \varepsilon_t \tag{2}$$

mit

$a_{1,t}$ determinierte Komponente der Zeitreihe (determinierter Teil des Wertes),
ε_t zufälliger Fehler,

generiert werden.
Das Prognosemodell hat dann die Form

$$\hat{x}_\tau(t) = \hat{a}_{1,t} \tag{3}$$

mit

$\hat{x}_\tau(t)$ Prognose zum Zeitpunkt t für τ-Schritte voraus,
$\hat{a}_{1,t}$ Bewertung von $a_{1,t}$.

Als Bewertung des Parameters $\hat{a}_{1,t}$ dient der Exponentialmittelwert $\hat{a}_{1,t} = S_t$.
Daraus folgt

$$\hat{x}_\tau(t) = S_t = \alpha \cdot x_t + \beta\, S_{t-1}. \tag{4}$$

Die Anfangsbedingungen werden aus der Gleichung

$$S_0 = \hat{a}_{1,0} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i \tag{5}$$

berechnet.
Der hauptsächliche Nachteil der Exponentialglättung liegt darin, daß die Wahl des optimalen Wertes des Glättungsparameters α_{opt} ohne gewisse Einschränkungen bzw. Zusatzinformationen bezüglich des Charakters der Zeitreihe schwierig ist. Denn der Glättungsparameter α charakterisiert die Reaktionsgeschwindigkeit des Modells $\hat{x}_\tau(t) = S_t$ auf die Änderung des Prozeßzustandes und gleichzeitig bestimmt er die Fähigkeit des Systems, zufällige Abweichungen zu glätten. Zur Glättung von zufälligen Abweichungen ist der Wert zu verringern, aber andererseits, um den letzten Meßwerten einen größeren Wichtungskoeffizienten zu geben, ist er zu vergrößern. Bild 1 zeigt ein Beispiel für einen Prozeß der Elektroenergieabnahme mit starken zufälligen Abweichungen. Das Prognosemodell mit dem Glättungsparameter $\alpha = 0{,}1$ bringt zum Ausdruck, wie effektiv die zufälligen Abweichungen geglättet werden.

— Bild 5 stellt die Abhängigkeit der Kriterien von der Länge l_{Fe} der Magnetkreise der Maschinen M1 bis M3 annäherungsweise dar.

4. Zusammenfassung

Die bisher durchgeführten Arbeiten wiesen auf einen Zusammenhang zwischen der Länge der massiven Teile im Magnetkreis und der Kommutierungsqualität hin, es war jedoch keine auch nur annähernde Abhängigkeit dieser Parameter von der Länge der massiven Teile l_{Fe} im Magnetfeld der Maschine bekannt.
Die Abhängigkeit $t_D = f(I_a)$ (Bild 3), $t_{D+} = f(I_a)$ (Bild 4) und die Abhängigkeit von t_D, t_{D+}; A_{D+}, A_{D-}, $\beta = f(l_{Fe})$ im Bild 5 geben dazu einen Überblick.
Durch Vergleich der Gl. (10) und Bild 6 in [5] kann die Ansicht geäußert werden, daß der Verlauf $t_{D+} = f(I_a)$ die anfangs ausgesprochene Voraussetzung bestätigt, unter der der Faktor ξ_0 für die Bewertung der Kommutierung von Gleichstrommaschinen geschaffen wurde. Dieser Faktor ist vom Stromanstieg in der Querachse der Gleichstrommaschine unabhängig. Durch Bewertung des Einflusses der Zusammensetzung des Magnetkreises auf die Verzögerung des Magnetflusses in der Querachse der Gleichstrommaschine durch Auswertung der 1. Ableitung des Magnetflusses $\Phi_\delta(t)$ ermöglicht eine Präzisierung der Diagnostik und künftig die Anwendung von EDV.

Literatur

[1] *Štěpina, J.; Bendl, J.:* Einfluß des Massiveisens im Kreise der Hilfspole auf die Kommutation der Gleichstrommaschinen in Übergangszuständen. Elektrotechnický obzor, Praha 49 (1960) 9, S. 454–459
[2] *Visingr, B.:* Methoden zur Bewertung der Eigenschaften von Gleichstrommaschinen mit Rücksicht auf die Kommutierung bei Speisung mit Gleichstrom in Übergangszuständen. Technická zpráva (Technische Nachricht) TZ 038 KESAP – FE VUT Brno 1975
[3] *Heller, B.:* Übergangserscheinungen im Massiveisen. Elektrotechnický obzor, Praha 42 (1953) 7, 8, S. 368–375
[4] *Veselka, F.:* Beitrag zur Erforschung des dynamischen Verhaltens des magnetischen Kreises in der Querachse der Gleichstrommaschine mit verschiedenartig ausgeführtem Magnetkreis. Technická zpráva (Technische Nachricht) TZ 100 KESAP – FE VUT Brno 1983, S. 47–58
[5] *Skobelev, V. E.; Paulig, E.:* Kriterium zur Bewertung des Einflusses der Magnetkreisausführung von Gleichstrommaschinen auf die Kommutierung bei dynamischen Betriebszuständen. ELEKTRIE 35, Berlin (1981) 2, S. 76–79

EA 5566

Für Zeitreihen mit Sprungcharakter (siehe Bild 2) ist jedoch das Modell mit kleinem Glättungsparameter α ($\alpha = 0{,}1$ im gewählten Beispiel) nicht anwendbar. Hier ist das Modell mit großem Glättungsparameter α (z. B. $\alpha = 0{,}9$) besser geeignet, das jedoch für die Zeitreihe entsprechend Bild 1 ungeeignet ist. Um diesen Widerspruch zu beseitigen, werden Prognosemodelle mit Exponentialglättung und Adaption des Glättungsparameters [1] [3] angewendet. Dabei wird der Glättungsparameter α auf der Grundlage des nachgeführten Signals (tracking signal) angepaßt:

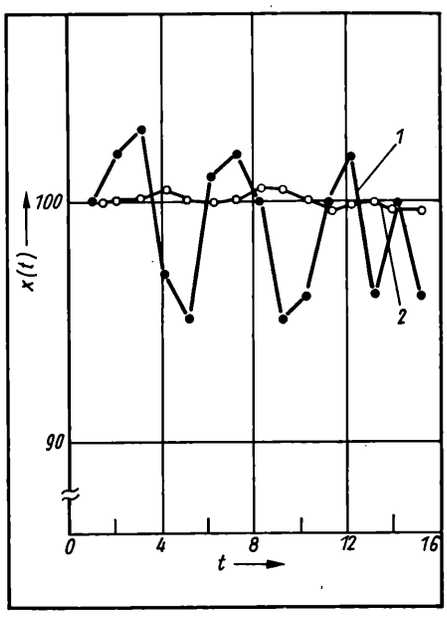
$$\alpha = \left| \frac{Q(T)}{\hat{A}(T)} \right|$$

mit

$Q(T)$ gelätteter Prognosefehler,
$\hat{A}(T)$ geglättete mittlere absolute Abweichung.

Bei großen Abweichungen des Prognosewertes vom Wert der Zeitreihe wird α vergrößert, stabilisieren sich jedoch die Parameter der Zeitreihe, wird α verkleinert. Damit kann das Prognosemodell mit Adaption des Glättungsparameters gut an den Prozeß der Elektroenergieabnahme angepaßt werden. Es gibt jedoch Anwendungsfälle, z. B. im Bild 3 angeführt, wo das Modell uneffektiv arbeitet. Die hier dargestellte Sprungfunktion (z. B. Anlaufvorgang großer Antriebe) wird vom Prognosemodell mit Adaption des Glättungsparameters α schon nach dem zweiten Schritt auf dem höheren Niveau gut verarbeitet. Allerdings braucht das Prognosemodell für den Rücksprung 6 Prognoseschritte, um sich dem Rücksprung und damit dem niedrigen Niveau wieder anzupassen.

Bild 1
Lastganglinie mit zufälligen Abweichungen
1 realer Prozeß;
2 Prognose ($\alpha = 0{,}1$)



2. Adaptives Kombinationsprognosemodell (AKM)

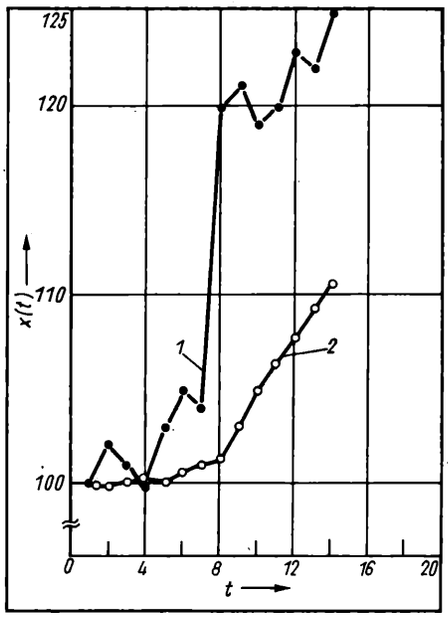
Im vorliegenden Beitrag wird ein flexibles, kombiniertes Prognosemodell der Elektroenergieabnahme betrachtet. Es besteht aus einer gewissen Anzahl einfachster Adaptionsmodelle.
Wie allgemein bekannt, ist der Prozeß der Elektroenergieabnahme von Industrieobjekten aus dem öffentlichen Netz nicht konstant, sondern unterliegt großen Schwankungen [4]. Die Lastganglinie von Industrieobjekten ist dabei durch Abschnitte mit gewisser gleichmäßiger Elektroenergieabnahme gekennzeichnet, die durch starke Laständerungen (sprunghaft) unterbrochen sind. Wie bereits dargelegt wurde, lassen sich die einzelnen Abschnitte der Lastganglinie nicht mit einem universellen Prognosemodell beherrschen. Als Basismodell wird vorgeschlagen, das Modell (4) mit unterschiedlichen Glättungsparametern α anzuwenden.

Beispiel

Auswahl der Basismodelle: drei

$\alpha = 0{,}1 \qquad \alpha = 0{,}5 \qquad \alpha = 0{,}9.$

Bild 2
Lastganglinie mit sprungförmiger Änderung
1 realer Prozeß;
2 Prognose ($\alpha = 0{,}1$)



2.1. Parameterselektion im AKM

Eine wichtige Frage ist die Selektion des besten Modells für den entsprechenden Abschnitt der Lastganglinie. In [3] werden dafür zwei Kriterien angeführt:

— Kriterium K
Die Umschaltung auf ein anderes Prognosemodell erfolgt dann, wenn die letzten Prognosewerte die besten gegenüber den anderen Modellen sind
— Kriterium B
Die Umschaltung auf ein anderes Prognosemodell erfolgt dann, wenn das exponentialgeglättete Fehlerquadrat der Prognose minimal ist.

Das Kriterium B wird folgendermaßen gebildet:

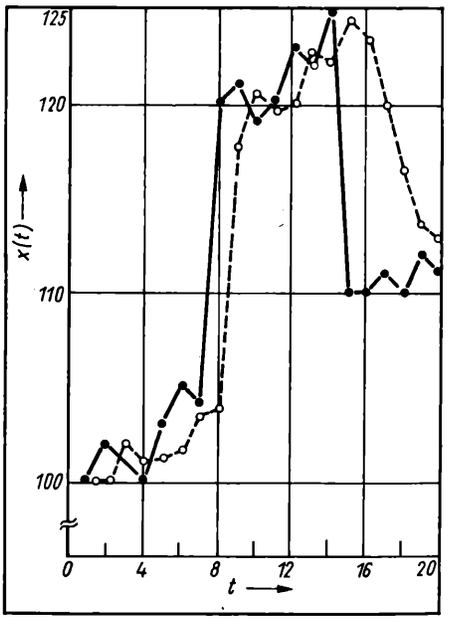
$$B_t = \alpha_B e_\tau^2 (t - \tau) + (1 - \alpha_B) \cdot B_{t-1} \qquad (6)$$

mit

$0 < \alpha_B < 1$ Glättungsparameter,
$e_\tau (t - \tau)$ Prognosefehler zum Zeitpunkt $t - \tau$ für τ-Schritte voraus.

Die Selektion nach dem Kriterium B erweist sich als günstiger, da Modellumschaltungen bei zufälligen Lastschwankungen ausgeschlossen werden. Bei der Prognose wird das Modell zwei Überprüfungen unterworfen. Die erste Überprüfung basiert auf der Analyse des mittleren Fehlerquadrates der vergangenen Meßwerte und gibt Auskunft darüber, ob es richtig war, vorliegendes Modell

Bild 3
Lastganglinie mit sprungförmiger Änderung und Rücksprung auf höheres Niveau
1 realer Prozeß;
2 Prognose (α mit Adaption)



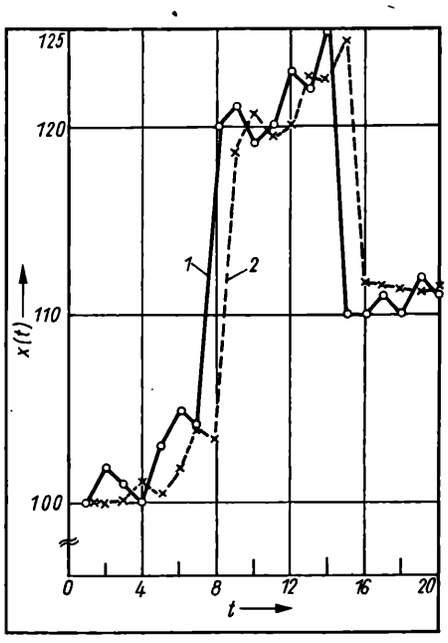


Bild 4
Lastganglinie mit sprungförmiger Änderung und Rücksprung auf höheres Niveau
1 realer Prozeß;
2 Prognose mit AKM

Tafel 1. Berechnungsresultate (Daten aus Bild 1)

N Lfd. Nr.	X_t	$\alpha = 0{,}1$		$\alpha = 0{,}5$		$\alpha = 0{,}9$	
		$\hat{x}_\tau(t)$	B_t	$\hat{x}_\tau(t)$	B_t	$\hat{x}_\tau(t)$	B_t
1	100	100[1])	**0**	100	0	100	0
2	102	100[1])	**2,4**	100	2,4	100	2,4
3	103	100,2[1])	5,66	101	3,36	101,8	**1,8**
4	97	100,5	**6**	102	16,34	102,9[1])	21,6
5	95	100,15[1])	16,5	99,5	18,7	97,6	**12,5**
6	101	100	**7,2**	97,25	16	95,3[1])	24,6
7	102	100,1[1])	**3,48**	99	11,8	100,4	11,4
8	100	100,3[1])	**1,45**	100,5	4,9	100	4,56
9	95	100,3[1])	17,44	100,25	18,5	100	**16,82**
10	96	100	16,6	97,6	9	95,5[1])	**6,9**
11	100	99,6	**6,5**	96,8	9,72	96[1])	12,36
12	102	99,64[1])	**6**	98,4	11,7	99,6	8,4
13	96	100[1])	**12**	100,2	15,3	101,8	23,5
14	100	99,6[1])	**4,9**	98,1	8,3	96,6	16,34
15	95	99,6[1])	15	99	**13,2**	100	21,5

[1]) Prognoseresultate mit dem AKM

Tafel 2. Berechnungsresultate (Daten aus Bild 3)

N Lfd. Nr.	X_t	$\alpha = 0{,}1$		$\alpha = 0{,}5$		$\alpha = 0{,}9$	
		$\hat{x}_\tau(t)$	B_t	$\hat{x}_\tau(t)$	B_t	$\hat{x}_\tau(t)$	B_t
1	100	100[1])	**0**	100	0	100	0
2	102	100[1])	**2,4**	100	2,4	100	2,4
3	101	100,2[1])	1,34	101	**0,96**	101,8	1,34
4	100	100,28	**0,58**	101[1])	0,98	101,8	1,24
5	103	100,25[1])	4,77	100,5	**4,14**	100,11	5,5
6	105	100,53	14	101,75[1])	8	102,7	**5,37**
7	104	101	11	103,4	3,42	104,77[1])	**2,5**
8	120	101,3	214,4	103,7	161	104,1[1])	**152,8**
9	121	103,2	287	111,9	114,1	118,4[1])	**65,2**
10	119	105	232	116,5	49,4	120,7[1])	**27,8**
11	120	106,4	204	117,8	22,7	119,2[1])	**11,2**
12	123	107,8	220	118,9	19,2	120[1])	**10**
13	122	109,3	185	121	8,28	122,7[1])	**4,3**
14	125	110,6	198	121,5	10,7	122,1[1])	**6,8**
15	110	112	**81,6**	123,3	110,5	124,7[1])	132,4
16	110	111,8[1])	**34,6**	116,7	71,1	111,5	54,3
17	111	111,6[1])	**14,3**	113,4	32	110,2	22,1
18	110	111,5[1])	**7,07**	112,2	15,7	111	9,44
19	112	111,35[1])	**3,1**	111,1	6,8	110,1	6
20	111	111,4[1])	**1,34**	111,6	3	111,8	2,8

[1]) Prognoseresultate mit dem AKM

zu den Basismodellen zu rechnen. Zweitens werden die Modelle nach dem Kriterium B dahingehend überprüft, welches den besten Prognosewert errechnet (in Tafel 1 und 2 halbfett gesetzt).

2.2. Anwendungsbeispiel für AKM

Als Beispiel sei ein selektiv-adaptives Kombinationsmodell (AKM) angeführt. Drei Modelle nach (5) der Exponentialglättung werden als Basismodelle mit den Parametern $\alpha = 0{,}1$, $\alpha = 0{,}5$ und $\alpha = 0{,}9$ angenommen.

Die Berechnungsresultate sind in Tafel 1 aufgeführt. Als Ausgangsdaten wurden die Werte nach Bild 1 benutzt, d. h. Lastganglinie mit zufälligen Lastschwankungen. In Tafel 1 sind die Prognoseresultate mit dem AKM gekennzeichnet (s. Fußnote). Wie zu erkennen ist, ergibt das Basismodell mit dem Parameter $\alpha = 0{,}1$ die besten Resultate. Daraus folgt jedoch nicht, daß die anderen Modelle des AKM überflüssig sind. Durch das Beispiel in Tafel 2 wird das belegt. Die Vorteile des AKM werden mit den geringen Prognosefehlern nachgewiesen.

Im Bild 4 wird die Sprungfunktion (siehe auch Bild 3) mit AKM prognostiziert. Als Ausgangsdaten dienen die Werte entsprechend Tafel 2 (Realisierung Bild 3).

3. Ergebnisse

Beim Vergleich der Prognosemodelle des vorgeschlagenen AKM mit dem Modell der Exponentialglättung und Adaption des Glättungsparameters α wird sichtbar, daß das AKM Vorteile bringt: AKM $\bar{e}^2 = 26{,}39$ gegenüber einem mittleren Fehlerquadrat für das Modell Exponentialglättung mit Adaption des Parameters α von $\bar{e}^2 = 42{,}3$.

Für die Realisierung mit Hilfe der Mikrorechen- und Mikroprozessortechnik sind die einfachen Modelle und Parameterumschaltungen von α besser zu implementieren als die Operation der Optimierung des Parameters α.

4. Zusammenfassung

Es wurde ein einfaches, adaptives, kombiniertes Prognosemodell (AKM) auf der Grundlage von Basismodellen vorgestellt. Die Vorteile dieses AKM für die Kurzzeitprognose wurden nachgewiesen. Das vorgeschlagene AKM ist universell für Zeitreihen (darunter Lastganglinien) mit unterschiedlicher Dynamik anwendbar.

Das vorgeschlagene Modell ist für die Prognose der Elektroenergieabnahme von Industrieobjekten besonders geeignet, wenn über den realen Prozeß und den Charakter der Elektroenergieabnahme wenig Daten vorliegen.

Literatur

[1] *Prachownik, A. W.; Rosen, W. P.; Degterew, W. W.:* Energiesparende Regime der Elektroenergieversorgung in Bergbaubetrieben. Moskau: Nedra 1985, 232 Seiten (russ.)

[2] *Prachownik, A. W.:* Automatisierte Steuerung der Elektroenergieabnahme. Kiew: Wischa Schkola 1986, 72 Seiten (russ.)

[3] *Lakuschin, Ju. P.:* Adaptive Methoden der Kurzzeitprognose. Moskau: Statistika 1979, 254 Seiten (russ.)

[4] *Nobis, A.:* Operative Lastprognose in industriellen Elektroenergieversorgungsnetzen. TH Leipzig, SEA 1.3-81-D-41

EA 5794

TAGUNGSBERICHTE

Tagung des TC 2 (rotierende elektrische Maschinen) der IEC

Vom 12. bis 14. Oktober 1987 tagte das Technische Komitee 2 (TC 2) — Rotierende Elektrische Maschinen — der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) in Sydney. Die Tagung folgte turnusmäßig der vom Oktober 1984 in Washington. Es waren 11 Nationalkomitees mit insgesamt 25 Delegierten vertreten.

In einem ersten Teil der Beratungen wurden die Berichte der Subkomitees (SC) des TC 2 entgegengenommen und Entscheidungen über deren weitere Arbeit gefällt.

Das Subkomitee 2A (SC 2A) — Turbogeneratoren — hat zur Herausgabe unter der Sechsmonateregel Dokumente vorbereitet, die folgende Vorhaben betreffen:

- Überarbeitung der Publikation 34-3 — Nenndaten und Charakteristiken von Turbogeneratoren
- Publikation eines Leitfadens für Einsatz und Betrieb wasserstoffgekühlter Turbogeneratoren.

Die vorgesehenen Arbeiten zu Fragen der Zuverlässigkeit von Turbogeneratoren werden fortgesetzt, sobald entsprechende Erkenntnisse aus der Arbeit der CIGRE vorliegen.

Das Subkomitee 2B (SC 2B) — Anbaumaße und Leistungsreihen — bereitet die Neuauflage der Publikationen 72 und 72 A über Abmessungen und Nennleistungen rotierender elektrischer Maschinen auf der Grundlage der zwischenzeitlich bestätigten Verbesserungen und Ergänzungen vor. Dabei werden die derzeitige Publikation 72 in eine Publikation 72-1 und die derzeitige Publikation 72 A in eine Publikation 72-2 übergehen. Auf der Tagung des TC 2 wurden keine neuen Aufgaben für das SC 2B formuliert.

Das Subkomitee 2G (SC 2G) — Prüfmethoden und -verfahren — arbeitet mit 3 zugeordneten Arbeitsgruppen (WG 1 ··· 3) an folgenden Komplexen:

- Verfahren der äquivalenten Belastung und Überlagerungsverfahren zur Messung der Erwärmung (WG 1)
- Spezielle Prüfverfahren für Asynchronmaschinen bei Netz- und Umrichterspeisung (WG 2)
- Spezielle Prüfverfahren für Gleichstrommaschinen (WG 3).

Nennenswerte Arbeitsfortschritte konnten nur in der WG 3 festgestellt werden. Die Nationalkomitees sind offensichtlich nicht durchgängig von der Bedeutsamkeit der derzeitigen Aufgaben des SC 2G überzeugt. Lediglich bezüglich der speziellen Prüfverfahren für Asynchronmaschinen besteht ein ungeteiltes Interesse. Das äußert sich auch darin, daß auf der Tagung des TC 2 ein Vorschlag für die Besetzung der z.Z. offenen Funktion des Sekretärs der WG 2 durch die BRD gemacht wurde.

Das Subkomitee 2H (SC 2H) — Schutzgrade, Kühlarten und Bauformen — hat unter der Sechsmonateregel Dokumente erarbeitet, die bezüglich der Publikation 34-6 — Kühlarten rotierender elektrischer Maschinen — eine Überarbeitung zum Ziel haben. Ein Entwurf dieser Überarbeitung zur Veröffentlichung unter der Sechsmonateregel ist in Vorbereitung. Bezüglich der Publikation 34-5 über die Klassifizierung des Schutzgrades rotierender elektrischer Maschinen sind zwei Dokumente unter der Sechsmonateregel in Umlauf gesetzt worden. Auf der Grundlage des Abstimmungsergebnisses erfolgt nunmehr die Vorbereitung einer Ergänzung. Sie wird die Einführung eines Schutzgrades „Wettergeschützte Maschinen" enthalten.

Das Subkomitee 2J (SC 2J) — Klassifizierung von Isoliersystemen für rotierende elektrische Maschinen — arbeitet mit 2 Arbeitsgruppen an einer mehrteiligen Publikation mit dem Titel „Funktionelle Bewertung von Isoliersystemen für rotierende elektrische Maschinen". Eine derartige Publikation ist erforderlich, um die Leitpublikation 505 „Leitfaden für die Bewertung und Identifizierung von Isoliersystemen elektrischer Ausrüstungen" für den Bereich der rotierenden elektrischen Maschinen zu untersetzen. Darüber hinaus erwächst das Erfordernis einer derartigen Publikation bezüglich der thermischen Bewertung aus der Neufassung der Publikation 85 „Thermische Bewertung und Klassifizierung von elektrischen Isolierungen" von 1984, in der keine Zuordnung der Isolierstoffe zu den Wärmebeständigkeitsklassen mehr besteht und die Verantwortlichkeit des Herstellers für die thermische Beständigkeit des Isoliersystems fixiert ist. Im Zuge der bisherigen Arbeit des SC 2J sind für folgende Teile der Publikation Dokumente unter der Sechsmonateregel herausgegeben worden:

- Teil 1: Allgemeine Richtlinien
- Teil 2—1: Prüfverfahren für Drahtwicklungen — thermische Bewertung und Klassifizierung
- Teil 3—1: Prüfverfahren für Formspulenwicklungen — thermische Bewertung und Klassifizierung.

An weiteren Teilen der Publikation wird gearbeitet.

Einen breiten Raum innerhalb der Tagung des TC 2 nahm die Beratung der laufenden Projekte zur Ergänzung der Publikation 34-1 „Rotierende elektrische Maschinen — Nenndaten und Betriebsverhalten" ein, für deren Bearbeitung eine der Arbeitsgruppen des TC 2 zuständig ist (WG 12). Diese laufenden Projekte betreffen im einzelnen

- eine Überarbeitung der Tafeln I, II und III für zulässige Übertemperaturen bzw. Temperaturen
- eine Überarbeitung des Abschnitts 12.2. über Form und Symmetrie der Spannungen und Ströme
- Ergänzungen zum Abschnitt 18 über gelegentliche Überströme
- eine Neufassung der Sektion 10 — Leistungsschilder
- eine Überarbeitung der Definitionen 2.15 und 2.16 für Sattelmoment und Kippmoment.

Im Zusammenhang mit der Bearbeitung des Projekts der WG 19 „Empfehlungen für Generatoren, die durch Kolbenkraftmaschinen angetrieben werden" wurde die WG 12 beauftragt, einen Vorschlag für die Aufnahme einer zeitweiligen thermischen Überlastbarkeit in die Publikation 34-1 auszuarbeiten.

Weitere Punkte der Tagesordnung der Beratung des TC 2 waren den weiteren Projekten des TC 2 sowie den Arbeitsgruppen gewidmet, die diese Projekte bearbeiten.

Die Vorbereitung einer Publikation über Erregersysteme durch die WG 16 hat einen solchen Stand erreicht, daß zu folgenden Teilen demnächst Dokumente unter der Sechsmonateregel veröffentlicht werden:

Kapitel 1: Definitionen

Kapitel 2: Modelle für die Untersuchung von Elektroenergiesystemen.

Dabei wird für Kapitel 1 der Status eines Standards und für Kapitel 2 der eines Berichts vorgeschlagen. Die Arbeit an den weiteren Kapiteln 3 bis 5 wird im Ergebnis einer vorgenommenen Abstimmung festgesetzt, obwohl eine Reihe von Nationalkomitees Zweifel an der Notwendigkeit eines derartigen Vorgehens deutlich werden ließen.

Die Überarbeitung der Publikation 34-9 — Geräuschgrenzwerte — durch die WG 14 war ein weiteres Mal Gegenstand einer breiten Diskussion. Schwerpunkte bildeten dabei die Höhe der zulässigen Grenzwerte sowie die Anwendung der beiden durch ISO 1680/1 und ISO 1680/2 zugelassenen Bestimmungsmethoden für die Pegel und deren Handhabung in der Publikation 34-9. Es wurde jedoch schließlich Übereinkunft über ein unter der Sechsmonateregel herauszugebendes Dokument erzielt.

Der Bericht der WG 14 forderte vom TC 2 eine Anleitung über die weitere Verfahrensweise zu den Fragen einer gesonderten Klassifizierung von Maschinen mit niedrigem Geräuschpegel sowie von Geräuschpegeln unter Last. Die Aufnahme der Arbeit zu diesen Punkten wurde jedoch nicht bestätigt. Die Delegierten kamen vielmehr einstimmig überein, die WG 14 von ihrer Aufgabe zu entbinden, sobald der laufende Vorgang zur Überarbeitung der Publikation 34-9 zum Abschluß gekommen ist.

Für eine vorgesehene Publikation über Impulsstehspannungen für rotierende elektrische Maschinen liegt ein Entwurf der zuständigen Arbeitsgruppe (WG 15) als Sekretariatsdokument vor. Es wurde beschlossen, diesen Entwurf als Dokument unter der Sechsmonateregel herauszugeben, obwohl von einigen Nationalkomitees beanstandet wurde, daß er steile Spannungswellen ausklammert, wie sie durch Vakuumschalter und andere hart arbeitende Schalter verursacht werden. Die WG 15 wurde deshalb beauftragt, die Arbeit in dieser Richtung auf der Grundlage der Vorstellungen der fordernden Nationalkomitees und mit dem Ziel fortzusetzen, daß eine gesonderte Publikation entsteht.

Das aus der Arbeit des vormaligen SC 2F unmittelbar durch TC 2 weitergeführte

Projekt über die Messung des Bürstendrucks liegt zwischenzeitlich als Sekretariatsdokument vor. Es wurde entschieden, das Dokument unter der Sechsmonateregel zu veröffentlichen.

Bezüglich der Überarbeitung der Publikation 34-14 über mechanische Schwingungen lag der Vorschlag einer Ergänzung vor, der jedoch keine allgemeine Unterstützung fand und deshalb nicht weiter verfolgt wird. Es wurde deshalb entschieden, die zuständige Arbeitsgruppe (WG 6) von ihren Aufgaben zu entbinden.

Für eine Publikation 34-xx über Generatoren, die durch Kolbenkraftmaschinen angetrieben werden, liegt ein Sekretariatsdokument der zuständigen Arbeitsgruppe (WG 19) vor, das mit dem TC 70/SC 2 der ISO abgestimmt wurde. Dabei besteht das Ziel, auf eine entsprechende ISO-Publikation zu verzichten. Es wurde entschieden, daß ein neues Sekretariatsdokument unter der sog. „Accelerated procedure" herausgegeben wird. Die WG 19 wird sich zukünftig ausschließlich mit den Leistungsparametern der Generatoren, die durch Kolbenkraftmaschinen angetrieben werden, befassen. Für die Fragen der zulässigen Größe der den Generatoren durch die Kolbenkraftmaschinen aufgezwungenen Schwingungen wird eine neue Arbeitsgruppe gebildet.
Zur Publikation 34-11-2 über Temperaturfühler und zugehörige Steuergeräte für eingebauten thermischen Schutz wird eine Ergänzung unter der Sechsmonateregel in Umlauf gesetzt. Damit ist die Arbeit auf diesem Gebiet abgeschlossen, und es wurde festgelegt, die zugehörige Arbeitsgruppe (WG 10) von ihrer Arbeit zu entbinden, sobald der laufende Vorgang zum Abschluß gebracht worden ist.

Die Überarbeitung der Publikation 50 (411) — Internationales Wörterbuch — durch die zuständige Arbeitsgruppe (WG 18) hat bereits umfangreiches Material in Form von Sekretariatsdokumenten entstehen lassen, ein Abschluß ist jedoch noch nicht abzusehen.

Am Schluß der Tagesordnung wurde über vorliegende Vorschläge zur Aufnahme neuer Arbeiten beraten.

Die Publikation 34-12 über das Anlaufverhalten von Kurzschlußläufermotoren soll entsprechend Vorschlägen der BRD und Australiens eine Ergänzung erfahren. Für ihre Vorbereitung wird eine neue Arbeitsgruppe gebildet.

Die Erarbeitung einer Publikation über Schritt- und Stellmotoren soll auf der Grundlage einer Anregung der USA in Angriff genommen werden. Es wird eine zugeordnete neue Arbeitsgruppe gebildet.
Im Anschluß an die Beratungen des TC 2 tagte die WG 12. Vorher hatten bereits Tagungen des SC 2B und des SC 2H stattgefunden. Die Durchführung dieser Tagungen in Sydney erfolgte auf Einladung des australischen Nationalkomitees. Die Organisation der Veranstaltungen lag in den Händen der Standards Association of Australia, die für eine ausgezeichnete Arbeitsatmosphäre sorgte und herzliche Gastfreundschaft gewährte.

G. Müller, Dresden EA 2747

Moderne Stromwechselrichter und ihre Anwendung

133. Sektionskolloquium Automatisierungstechnik der Technischen Universität Karl-Marx-Stadt

Mit dem Ziel der Vorstellung einer neuen Stromrichterbaureihe für Drehstromantriebe sprach am 14. Januar 1988 Dipl.-Ing. *P. Hein*, Mitarbeiter des VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin, Werk Industrielle Elektronik Berlin, über die praktische Realisierung von Stromzwischenkreisumrichtern.
Nach Einordnung dieser Umrichterbaureihe in das Spektrum der möglichen Stellglieder für Drehstrommotore, ging der Referent speziell auf die Frequenzumrichtertypen DU6—DDU 380/30 · · · 205 (20 · · · 135 kVA) ein.. Nach Erläuterung des Leistungsteils erfolgte anhand eines Blockschaltbildes die Beschreibung der mehrschleifigen Regelstruktur. Dabei wurde besonders auf die absolute Kippsicherheit des Drehstrommotors bei diesem Regelungskonzept hingewiesen.
Bei Stromwechselrichterbetrieb ist der Motor ein Element des Kommutierungskreises. Die Kommutierungskapazität muß an die jeweiligen Motorentypen angepaßt werden. Der Referent erläuterte die Möglichkeiten der Anpassung und stellte danach die Untersuchungsergebnisse zum Problemkreis „thermische Grenzkennlinien der Motoren bei Stromwechselrichterspeisung" vor.
Genannt wurden auch die Probleme der Erprobung dieser Antriebe an Industrieanlagen und die Notwendigkeit der Messung und der Angabe der thermischen Grenzkennlinien der Standardmotoren durch die Motorenhersteller der DDR.
Als repräsentative Referenzanlage wurde das Chemiefaserwerk Premnitz, Objekt „Wolpryla" genannt. Dort werden 39 Spinnflüssigkeitspumpen und 5 Dünnschichtverdampfer mit insgesamt 44 Frequenzumrichtern betrieben. Auch Heißwasserpumpen, Kompressoren und lufttechnische Anlagen werden mit diesen Geräten gesteuert.
Der bisherige Einsatz zeigte eine hervorragende Zuverlässigkeit. Bei der Konzipierung dieser Frequenzumrichter wurde der größte Wert auf die Betreiberfreundlichkeit und Verfügbarkeit gelegt.
Die anschließende umfangreiche Diskussion ließ das große Interesse an Stellgliedern für Drehstromantriebe erkennen.

G. Tippmann; P. Hein
Karl-Marx-Stadt EA 2792

Kleinantriebe

mit ihrer zunehmenden Bedeutung für die Automatisierung und für die Heimtechnik werden auf dem 8. Symposium Elektromaschinenbau behandelt (siehe Aktuelle Information im Heft 3/1988). Die technologischen Probleme sind der Schwerpunkt unseres Heftes 8/1988.

Die Redaktion

DISSERTATIONEN

Wissenschaftlicher Beitrag zur Entwicklung von Hochspannungsschaltgeräten und -schaltanlagen, vorzugsweise auf Basis der SF_6-Technik

Von *O. Müller*
Dissertation B, Technische Universität Dresden, 1987

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. *W. Mosch*, Prof. Dr.-Ing. *H. Olbrisch*, Prof. Dr. sc. techn. *F. Noack*

Die Dissertation besteht aus mehreren, zur gleichen Thematik gehörenden Einzelleistungen des Verfassers (§ 4 der Promotionsordnung B).
In einem Resümee werden die Forderungen zur Entwicklung eines neuen Erzeugnisses dargestellt, wenn dieses Erzeugnis einen Qualitätssprung ermöglichen soll. Voraussetzungen sind neue Werkstoffe und/oder bisher nicht genutzte physikalische Zusammenhänge und/oder neue Technologien und/oder neue Prüfverfahren.
Anhand von Detailaufgaben zu Problemen der Mechanik, Plasmatechnik, Stromleittechnik, Isoliertechnik, Bauteiltechnologie, Montagetechnologie wird gezeigt, welche beachtliche Wirkungsbreite ein Ingenieur bei der Realisierung eines großen Erzeugniskomplexes aufweisen muß. Die Darstellungen werden am Beispiel der Entwicklung der SF_6-isolierten Schaltanlagen des VEB Transformatorenwerk „Karl Liebknecht" Berlin beschrieben, bei der der Verfasser als Themenleiter wirkte und über 100 Schutzrechte anmelden konnte.

W. Mosch, Dresden EA 2763

Zum Verständnis der Streuung der Durchschlagspannung und deren Einfluß auf Konditionierung und Prüfung von Gasisolierungen mit schwach inhomogenem Feld

Von *R. Michel*
Dissertation A, Technische Universität Dresden, 1987

Gutachter: Prof. Dr. sc. techn. *H. Böhme*, Prof. Dr.-Ing. habil. *J. Maksymiuk*, Prof. Dr. sc. nat. *Jüttner*, Doz. Dr. sc. techn. *W. Hauschild*

Ursache der Streuung experimentell ermittelter Durchschlagspannung ist die Überlagerung von

— durchschlagprozeßbedingter Streuung
— einer Streuung, herrührend von zufälligen Randbedingungen (Makro- und Mikrogeometrie) und
— einer Streuung durch zufällige Meßfehler.

Zur Berechnung der Durchschlagspannung technischer Isolierungen haben sich halbempirische Verfahren unter Verwendung der Modellvorstellungen vom Streamermechanismus bewährt. Der Einfluß makroskopischer Abweichungen auf die Durchschlagspannung kann mit Hilfe der Berechnung des elektrostatischen Feldes nachgewiesen werden. Für das Verhalten mikroskopisch kleiner Schwachstellen wurden Modellvorstellungen entwickelt. Mit dem

PATENTE

Einrichtung zum Ansteuern der Aktoren an Hochspannungsschaltgeräten

DD-WP: 352 320
Int.-Cl.: H 01 H 33/59
Anmeldetag: 14. 10. 1986
Anmelder: VEB Transformatorenwerk „Karl Liebknecht", Berlin

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Einrichtung zur Ansteuerung von Aktoren an Hochspannungsschaltgeräten konstruktiv so zu gestalten, daß die von der Schaltwarte gegebenen elektrischen Befehlsimpulse für die ein- oder dreipolige Ein- und Ausschaltung von Hochspannungsschaltgeräten potentialfrei zu den Aktoren übertragen werden, wobei die Länge der elektrischen Befehlsimpulse nicht durch die den Aktoren eigenen notwendigen Beaufschlagsimpulszeiten bestimmt wird, und mit der die Verriegelung ebenfalls potentialfrei erfolgt und elektromagnetische Fremdeinflüsse und Störspannungen nicht zu Fehlschaltungen führen und die Lebensdauer der eingesetzten Bauelemente erhöht wird.
Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe dadurch gelöst, daß die Übertragung des von der Schaltwarte gegebenen elektrischen Befehlsimpulses zur Ansteuerung der Aktoren in bekannter Weise einen Opto- oder Fotothyristor hat, deren optische Übertragungsstrecke durch Trübung gedämpft ist und deren Sender-Empfänger-Distanz ein träges Arbeiten gegenüber Störspannungen gewährleistet, und in der eine Streulinse und zwei Blenden angeordnet sind, wobei eine Blende mit einem Blendenrelais und eine Blende mit einem in Reihe zur Empfängerseite des Opto- oder Fotothyristors und der Aktoren liegenden Hilfsschalter, dessen Kontakten parallel Kondensatoren zugeschaltet sind, verbunden ist.
Die Potentialtrennung zwischen Hochspannungsschaltgerät und Schaltwarte wird durch die optische Übertragungsstrecke des Optothyristors gewährleistet. Damit der Optothyristor sicher gegen elektromagnetische Störbeeinflussung arbeitet, ist die Ansteuerleistung des Thyristors zu erhöhen, so daß er auf Störspannungen nicht reagiert. Dazu ist eine Steuerleistung des eingesetzten Optothyristors von größer 100 zur Zündung des Thyristors notwendig. Das entspricht bei einer Steuerspannung von 220 V einer Steuerleistung von 22 W.

D. Ufert, Berlin EA 2766

Kontaktsystem für Vakuumschalter

DD-WP: 253 508
Int.-Cl.: H 01 H 33=66
Anmeldetag: 23. 10. 1986
Anmelder: VEB Elektroprojekt und Anlagenbau, Berlin

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Kontaktsystem für Vakuumschalter zu schaffen, das so auszubilden ist, daß es selbst ein Magnetfeld quer zur Längsachse der Schaltkammer erzeugt.
Erfindungsgemäß wird das dadurch erreicht, daß zumindest eine der beiden in der Schaltkammer sich gegenüberstehenden Stromzuführungen an ihrer Stirnseite einseitig in bezug auf die Achse der Stromzuführungen, und zwar im wesentlichen auf der der Auffangelektrode gegenüberliegenden Seite, mit einem ein Quermagnetfeld erzeugenden, vorzugsweise U-förmig ausgebildeten Kontaktstück versehen ist, dessen mit der Stromzuführung in leitender Verbindung stehender Schenkel als Kontaktträger außerhalb der Stromzuführung mit dem zweiten als Kontaktscheibe dienenden Schenkel leitend verbunden ist. Der Raum zwischen dem Kontaktträger und der Kontaktscheibe ist zumindest teilweise mit einem Isolierstoff ausgefüllt.
Wird nicht bereits durch diese Ausbildung des Kontaktsystems eine ausreichende phasenverschiebende Wirkung zwischen dem Ausschaltstrom und der magnetischen Feldstärke erreicht, so kann nach einem weiteren Merkmal der Erfindung in der Nähe der Kontaktfläche der Kontaktscheibe auch noch zusätzlich ein Werkstoff mit hoher elektrischer Leitfähigkeit angeordnet werden, indem beispielsweise der Kontaktträger aus einem Werkstoff mit hoher elektrischer Leitfähigkeit besteht. Hierdurch wird erreicht, daß durch Wirbelströme eine Phasenverschiebung zwischen dem Ausschaltstrom und der magnetischen Feldstärke herbeigeführt wird, die ein Viertel einer Wechselstromperiode beträgt, bei 50 Hz beispielsweise 5 ms.

D. Ufert, Berlin EA 2765

Verfahren zur Herstellung von Federkontaktreihen mit Kontaktpotentialen für Mehrfachanschluß

DD-WP: 253 122
Ing.-Cl.: H 01 R 23/16
Anmeldetag: 30. 09. 1986
Anmelder: VEB Elektroprojekt und Anlagenbau, Berlin

Ziel der Erfindung ist es, ein Verfahren zur Herstellung von Federkontaktreihen zu schaffen, das mit wenig Aufwand und einfacher Technologie Federkontaktreihen herstellt, die sich leicht und mit geringem Zeitaufwand an entsprechende Erfordernisse anzuschließender Bauelemente anpassen lassen.
Erfindungsgemäß wird die Aufgabe dadurch gelöst, daß ein Federblech in einer bestimmten Grundform ausgestanzt wird, bei der die Stanzschnitte zwischen den einzelnen Federkontakten wechselseitig die Stanzflächen miteinander verbinden und deren Auflageflächen voneinander trennen. Aus der ausgestanzten Form werden die Federzungen mit Steckabbiegung, Kontaktfläche und Klemmdruckteil an ihren Biegekanten entsprechend abgewinkelt und die Standflächen mit den Federzungen an den Biegekanten der Auflageflächen senkrecht zueinander zu einer Kontaktreihe mit linearer Anordnung der Kontaktflächen geboten. Diese Kontaktreihe kann durch wechselseitiges Aneinanderfalten der Federkontakte an den Biegekanten der Standflächen, an denen die Federkontakte wechselseitig miteinander verbunden sind, in eine Kontaktreihe mit paralleler Anordnung der Kontaktflächen bzw. in eine Kontaktreihe mit linearer und paralleler Anordnung der Kontaktflächen überführt werden. Mit einer Grundform und auf der Grundlage eines Stanz-Biege- und Faltverfahrens ist es möglich, drei Arten von Federkontaktreihen mit unterschiedlicher Anordnung der Kontaktflächen herzustellen, die einen Mehrfachanschluß elektronischer Bauelemente im 2,5-mm-Raster realisieren. Die parallele Anordnung der Kontaktflächen ist hierbei in den Fällen sinnvoll, wenn es sich um den Einsatz und die direkte Kontaktierung von Flachanschlüssen (PIN) mikroelektronischer Bauelemente (IS) handelt und wenn jeder Flachsteckanschluß einen Mehrfachanschluß bekommen soll.

D. Ufert, Berlin EA 2767

Schaltkontaktstücke für Vakuumschaltgeräte und Verfahren zu deren Herstellung

DD-AP: 253 503
Int.-Cl.: H 01 H 1/04
Anmeldetag: 28. 01. 1987
Anmelder: Siemens AG, Berlin(West)

Schaltkontaktstücke für Vakuumschaltgeräte bestehen üblicherweise aus einem Grundmaterial mit Zusätzen leicht verdampfbarer Komponenten zum Erzeugen einer hinreichend leitenden Schaltstrecke beim Ausschaltvorgang. Angestrebt wird ein überspannungsfreies Schaltverhalten des Vakuumschaltgerätes. Das wird erfindungsgemäß dadurch erreicht, daß die Zusätze in einer die Schaltfläche des Kon-

Modell der durchschlagabhängigen Schwachstellen gelingt es, die Streuung der Durchschlagspannung, die Konditionierung und die Rückwirkung des Prüfkreises bei Wiederholversuchen besser zu verstehen. Das Modell geht von der Idee aus, daß bei einem Durchschlag eine Schwachstelle verschwindet und neue Schwachstellen gebildet werden. Die Anzahl der Neubildungen ist poissonverteilt.
Mit Hilfe der doppelexponentialverteilten Zufallsgröße Rauheitsfaktor (e_{f63}) kann für eine vorgegebene Elektrodenanordnung die Verteilungsfunktion der Durchschlagspannung berechnet werden. Die Parameter des Rauheitsfaktors werden dazu experimentell aus Großzahlversuchen bestimmt. Es wurde bestätigt, daß durch Konditionierung eine schwach inhomogene SF_6-Isolierung hinsichtlich der Höhe der Durchschlagspannung verbessert werden kann. Dabei ist der Konditionierungseffekt von den Prüfkreisparametern abhängig. Eine Schaltung für die Konditionierung unter Berücksichtigung der Prüflingseigenkapazität wurde entwickelt.

H. Böhme, Dresden EA 2761

BUCHER

BASIC für Mikrorechner
Programmentwicklung, Sprachelemente, Anwendungen

Von *D. Werner*, Berlin: VEB Verlag Technik 1986, 240 Seiten, 70 Bilder, 22 Tafeln, Pappband 25,— M, Bestell-Nr. 553 6087

Die Entwicklung der dezentralen Rechentechnik führt auf fast allen Gebieten zur Anwendung von Personal-Computern. Dafür werden Programme benötigt, die ohne viele Vorkenntnisse aufgestellt werden können. Deshalb sind fast alle Computer der 8-bit- und 16-bit-Klasse mit einem BASIC-Interpreter ausgerüstet. Der Autor wendet sich an die Anfänger in der Rechentechnik, die selbst Programme aufstellen wollen. Das Buch wird daher sowohl von Schülern, Studenten und Werktätigen der verschiedensten Disziplinen, mit und ohne Mathematikausbildung, benutzt werden. Auch Besitzern von Home-Computern wird es eine wertvolle Stütze sein.
Nach einer Übersicht über die Computer mit Erläuterungen der Fachbegriffe wird das Wichtigste über eine Programmentwicklung dargestellt. Der Leser sollte deshalb die ersten beiden Abschnitte zunächst nur überfliegen und vom 3. Abschnitt an das Buch durcharbeiten und sich am Computer üben. Mit diesem Buch und der speziellen Bedienungsanleitung des benutzten Computers kann man das Programmieren selbst erlernen.
Zunächst werden die wichtigsten BASIC-Befehle erläutert. Hierzu werden kleinste und dann größere Programme gezeigt. Auch das Rechnen mit BASIC wird mit übersichtlichen, leicht überschaubaren Programmbeispielen, anfangs nur 6 Zeilen lang, dem Leser klar gemacht.
Im Abschnitt „Programmstrukturen in BASIC" werden für etwas größere Ansprüche Verzweigungen im Programm, d.h. Programmsprünge, Unterprogramme sowie die Laufanweisungen anhand von nunmehr anspruchsvolleren Programmen behandelt. Auch ein Beispiel für einfache grafische Darstellung einer Sin-Funktion wird den Lesern erläutert. Das Arbeiten mit Datenfeldern (indizierten Variablen) wird mit Beispielen geübt.
Der Textverarbeitung mit Hilfe von BASIC ist ein besonderer Abschnitt gewidmet. Es werden zunächst die notwendigen Funktionen erklärt und dann interessante Programme, wie

— Druck von Tafelrahmen
— Sortieren eingegebener Textkonstanten
— Ausdrucken von Text im Blocksatz (Rechts- und Linksabgleich)
— Mischen von Dateien,

gebracht. Nach einer Erläuterung über Maschinenprogramme werden im Abschnitt BASIC-Programm Mathematik-Programme gezeigt, die dem Praktiker nützlich sind:

— Matrizenberechnung
— Lösung von Gleichungssystemen
— Berechnung einer Regressionsgeraden
— Regelung einer Lichtsignalanlage
— Ansteuerung eines Fernschreibers.

Am Schluß des Buches sind neben dem Sachwörterverzeichnis Tabellen für ASCII-Zeichen, Befehle, Operatoren und BASIC-Fehlerkodes angeordnet. In diesen Tabellen wird z.T. auf die jeweiligen Abschnitte des Buches hingewiesen.

F. Hoppadietz, Berlin EA 2788

Power Supplies
Part A: Linear Power Supplies, DC-DC Converters
Part B: Switched-mode Power Supplies

Von *Ödön Ferenczi*, Budapest: Akadémiai Kiado und Amsterdam: Elsevier Science Publishers 1987, 744 Seiten, 522 Bilder, 30 Tafeln

Stromversorgungseinrichtungen sind untrennbare Bestandteile elektronischer Geräte und Ausrüstungen. Die in den letzten Jahrzehnten erfolgte drastische Miniaturisierung und Herabsetzung des Energiepegels in den Bereichen der Informationstechnik verbunden mit den Aspekten der rationellen Energieanwendung erzwangen die Ablösung der schweren, raumkonsumierenden und mit niedrigem Wirkungsgrad arbeitenden konventionellen Versorgungseinheiten. Sie wurde durch die Entwicklung auf dem Gebiet der Halbleitertechnik und durch die Anwendung neuer Wirkprinzipien und Schaltungskonzepte in den Bereichen der Stromversorgungstechnik ermöglicht. Unbeschadet dieser Tatsache sind weltweit alle Anstrengungen darauf gerichtet, für die Versorgung elektronischer Einrichtungen noch kleinere, leichtere, zuverlässigere und hinsichtlich des Wirkungsgrades noch effektivere Netzteile bereitzustellen. Die Verwirklichung dieser Zielstellung wird durch die beiden vorliegenden Bände sehr gut unterstützt.
Der erste Band (Part A) ist inhaltlich in drei Teile gegliedert. Im ersten Teil werden die Grundlagen der Stromversorgungstechnik behandelt. Das heißt, es werden eine allgemeine Übersicht zu den Netzteilen mit Gleichspannungsausgang gegeben und die Trends der weiteren Entwicklung beschrieben. Ausführlich werden daran anschließend die in Verbindung mit Stromversorgungseinheiten relevanten Termini erläutert, die zur Charakterisierung von Netzteilen erforderlichen Parameter zusammengestellt und gezeigt, welche Aspekte für die Auswahl von Stromversorgungseinheiten auf der Grundlage von Herstellerkatalogen maßgebend sind.
Im zweiten Teil werden die analogen geregelten Netzteile behandelt und insbesondere Fragen der Optimierung sowie die Eigenschaften und Anwendungen verfügbarer Schaltkreise zur Spannungsregelung in den Vordergrund der Betrachtungen gestellt.
Gegenstand des dritten Teils schließlich sind die Gleichspannungs-Gleichspannungs-Konverter, wie sie in transportablen und mobilen elektronischen Einrichtungen angewendet werden, um aus Batterien die zum Betrieb der elektronischen Funktionseinheiten erforderlichen Versorgungsspannungen zu generieren.
Der zweite Band (Part B) konfiguriert sich aus insgesamt fünf Teilen und hat speziell die Schaltnetzteile zum Gegenstand.
Der erste Teil enthält die in Verbindung mit Schaltnetzteilen interessierenden Grundlagen, einen Vergleich zu den analogen stabilisierten Versorgungssystemen, grundsätzliche Methoden zur Masse- und Volumenreduktion sowie Fragen des Entwurfs.
Im zweiten Teil werden die bei der Leistungsstufe möglichen Schaltungsvarianten behandelt sowie die optimale Auswahl der Komponenten eines Schaltnetzteils ausführlich diskutiert.
Im dritten Teil sind die in Schaltnetzteilen zur Anwendung kommenden Schutz- und Regelungsschaltungen und ihre Realisierung in integrierter Schaltkreistechnik beschrieben. Rund zwanzig einschlägige Schaltkreise werden dazu eingehend in ihrer schaltungstechnischen Umgebung betrachtet.
Der vierte Teil ist dem Fragenkomplex der EMV-gerechten Gestaltung von Schaltnetzteilen gewidmet, und im fünften Teil werden abschließend einige ausgeführte Netzteile vorgestellt, die mit Schaltfrequenzen von 20 bis 200 kHz arbeiten.
Im Sinne einer Gesamteinschätzung ist das vorgelegte zweibändige Werk als ein vorzügliches Arbeitsmaterial für Techniker und Ingenieure zu werten, die sich mit der Entwicklung und Gestaltung der Stromversorgung elektronischer Geräte und Systeme zu befassen haben. Sicher wird es auch Studenten einschlägiger Studienrichtungen eine Hilfe in der Fachausbildung sein. Da es keinen unnützen theoretischen Ballast enthält, wird es einen breiten Leserkreis finden.

E. Habiger, Dresden EA 2748

taktstückes bedeckenden festhaltenden Schicht konzentriert sind. Derartige Kontaktstücke lassen sich insbesondere durch direktes Aufschmelzen der Zusätze, durch Anschmelzen einer separaten Auflage aus den Zusätzen in Pulverform, als Granulat oder als Folie bzw. Blech oder aber auch durch Aufdampfen der Zusätze auf die Schaltfläche eines vorgegebenen Körpers aus Grundmaterial herstellen. Als Grundmaterial wird vorteilhafterweise ein CuCr-Kontaktwerkstoff verwendet.

D. Ufert, Berlin EA 2764

Kataloge

über die lieferbare und in Kürze erscheinende Literatur des VEB Verlag Technik sind in jeder Fachbuchhandlung oder direkt im Verlag, Abteilung Absatz/Werbung, kostenlos erhältlich.

Документация

Бирке, К.; Вальтер, Х.; Рошитцки, В.
Автоматизированные системы проектирования и управления производством для электрических систем и приводов
ELEKTRIE, Берлин 42 (1988) 6, стр. 205—207, 2 рис., 5 лит.
Применение решений автоматизированных систем проектирования и управления производством в изготовлении электрических машин вследствие их применения в приводных системах приводит к непосредственной увязке с производственным процессом. Хозяйственные эффекты могут достигаться при последовательной интеграции всего процесса воспроизводства предприятия и приводят к решениям интеграции ЭВМ в производственный процесс, специально рассчитанным на данную производственную структуру.

Тиммель, Х.; Югель, У.
Управляемый от микро ЭВМ линейный привод позиционирования с элементарными шагами перемещения меньше 10 мкм
ELEKTRIE, Берлин 42 (1988) 6, стр. 208—213, 9 рис., 1 табл. 36 уравн., 9 лит.
Представляется прототип управляемого от микроЭВМ линейного привода позиционирования с элементарными шагами перемещения меньше 10 мкм. Дается общее описание построения, принципа действия и рабочей характеристики рассматриваемого реактивного синхронного линейного двигателя. На основе взаимодействия управляющей 8-разрядной микроЭВМ, транзисторного импульсного исполнительного элемента и линейного двигателя реализуется привод позиционирования с элементарными шагами перемещения меньше 10 мкм.

Беккерт, У.
Теория динамической характеристики асинхронных двигателей трехфазного тока с ротором вытеснения тока
ELEKTRIE, Берлин 42 (1988) 6, стр. 213—216, 4 рис., 34 уравн., 3 лит.
Разрабатывается математическая модель асинхронного двигателя с многоклеточной обмоткой в роторе, позволяющая рассчитывать явления вытеснения тока и в динамическом режиме работы. Введение пространственных указателей дает хорошо обозримое в математическом отношении изображение.

Порцель, Р.; Линзель, К.-Х.
Контрольно-испытательный прибор для проверки изоляции высоковольтных обмоток электрических машин
ELEKTRIE, Берлин 42 (1988) 6, стр. 217—219, 7 рис., 5 уравн., 7 лит.
Дается описание прибора для проверки изоляции высоковольтных обмоток электрических машин. Высокая чувствительность достигается благодаря применению в качестве измеряемого значения коэффициента затухания. Ссылаясь на блок-схему дается описание основных узлов: блока мощности, информационного блока, блока управления. Взаимосвязи между измеряемым значением и параметром погрешности, полученные экспериментальным путем, подтверждают высокую чувствительность метода испытания и надежность устройства.

Кёниг, Х.
Определение параметров асинхронных машин трехфазного тока предпочтительно из данных указанных на типовых табличках
ELEKTRIE, Берлин 42 (1988) 6, стр. 220, 18 уравн.
Для определения показателей динамического режима работы асинхронных машин выводится малотрудоемкий метод. Исходя из описания машины в координатной системе ориентированной на роторный поток, составляются уравнения для определения параметров, действительных в номинальной точке, базирующие только на данных малотрудоемкого опыта в холостом ходе и на данных, указанных на типовых табличках. На примере иллюстрируется возможность несложного применения данного метода.

Дидрихс, В.
Об идентификации модельных параметров электрических машин посредством стохастической оптимизации
Часть 2: Вероятность глобальности экстремальных значений, найденных посредством методов случайного поиска
ELEKTRIE, Берлин 42 (1988) 6, стр. 221—224, 4 рис., 20 уравн., 18 лит.
Оценка глобальности найденных экстремальных значений представляет собой нерешенную проблему. Она обсуждается под понятием „вероятности глобальности". Выводятся последствия для оформления случайного поиска экстремальных значений.

Краузе, М.
Нагрузки синхронной машины в асинхронном режиме работы. Часть I
ELEKTRIE, Берлин 42 (1988) 6, стр. 224—227, 4 рис., 2 табл., 5 уравн., 7 лит.
Исходя из состояния разработки комплексных противоаварийных автоматических выключателей рассматривается асинхронный режим работы турбогенераторов. В качестве квазистационарного асинхронного режима может допускаться только режим работы без возбуждения. Для улучшения условий симметрии в роторе и для ограничения перенапряжений в обмотке возбуждения требуется включение ее накоротко через дополнительное сопротивления. Для поддержания в допустимых пределах тока статора требуется сокращение не менее чем в 40 % номинальной мощности.

Езингман, Д.; Моргенфрю, Б.
Влияние качества щеток на рабочую характеристику машин постоянного тока с питанием от батареи
ELEKTRIE, Берлин 42 (1988) 6, стр. 228 и 229, 5 рис., 2 лит.
Исходя из идеальной формы характеристики скорости вращения — вращающего момента машин постоянного тока параллельного возбуждения дается заключение оттом, что для машин с низкими значениями на клеммах щетки определенного качества дают существенный скачок скорости вращения при переходе от моторного режима к генераторному. В некоторых случаях применения это приводит к тому, что машина с щетками такого качества оказываются непригодной и неприменяемой не по энергетическим соображениям, а по функциональным.

Веселька, Ф.
„Короткое замыкание якорной цепи" и новые критерии сравнения в исследовании характеристики коммутирования
ELEKTRIE, Берлин 42 (1988) 6, стр. 230—232, 5 рис., 5 лит.

Калинчик, В. П.; Баккман, Хр.
По вопросам оперативного прогнозирования потребления электроэнергии промышленных объектов
ELEKTRIE, Берлин 42 (1988) 6, стр. 232—234, 4 рис., 2 табл., 6 уравн., 4 лит.

Documentation

Birke, K.; Walther, H.; Roschitzki, W.
CAD/CAM-Systems for Electric Machines and Drives
ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 6, pp. 205—207, 2 Figs., 5 Refs.
The application of CAD/CAM-solutions in producing electric machines leads because of its use in drive systems to a direct coupling with the production process. Economical advantages may be reached through integrating consequently the whole reproduction process, and it results in CIM-solutions, dimensioned, especially, to the corresponding production structure.

Timmel, H.; Jugel, U.
Microcomputer Controlled Linear Positioning Drive with Elementary Pitches below 10 µm
ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 6, pp. 208—213, 9 Figs., 1 Table, 36 Equations, 9 Refs.
The prototype of a microcomputer controlled linear positioning drive with elementary pitches below 10 µm is represented. Construction, operation mode and performance of the studied reluctant linear motor are illustrated summary. Through the interaction of the 8 bit microcomputer control, transistor pulse regulating unit and linear motor a positioning drive is realized with elementary pitches below10 µm.

Beckert, U.
Theory of the Dynamic Behaviour of Three-Phase Asynchronous Motors with Current Displacement Rotor
ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 6, pp. 213—216, 4 Figs., 34 Equations, 3 Refs.
The mathematical model of an asynchronous motor with a multiple squirrel-cage winding in the rotor is developed, by means of which the current displacement effects may be computed, too, in the dynamical operation. The introduction of space vectors provides for a mathematically clear illustration.

Porzel, R.; Linsel, K.-H.
Insulation Testing Device of High-Voltage Windings of Electric Machines
ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 6, pp. 217—219, 7 Figs., 5 Equations, 7 Refs.
A device of testing the insulation of high-voltage coils of electric machines is described. By using the damping factor as measuring value a high sensivity is reached. By means of the block diagram the main components power part, information part, and control part are described. Connections between measuring value and fault parameter, determined experimentally, proce the high sensivity of the testing method and the reliability of the equipment.

König, H.
Determination of the Parameters of Three-Phase Asynchronous Machines from the Specifications of the Identification Plate Mainly
ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 6, p. 220, 18 Equations
For evaluating the characteristic values of the dynamic operation of asynchronous machines a method of low expenditure is derived. Starting from the description of the machine in the coordinate system, oriented to rotor flux, the determining equations of the parameters, applied to the rated point, are estimated, which only are basing upon the data of the no-load test of low expenditure and upon the specifications of the identification plate. An example makes clear the manipulation mode of that method.

Diedrichs, V.
To the Identification of the Model Parameters of Electric Machines by Means of Stochastic Optimization
Part 2: Globality Probability of Extrema Found by Random Search Methods
ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 6, pp. 221—224, 4 Figs., 20 Equations, 18 Refs.
The globality evaluation of found extrema represents an openly seeming problem. This is discussed with the term „globality probability". Consequences for designing stochastic extrema search are derived.

Krause, M.
Loads of the Synchronous Machine during Asynchronous Operation,
Part 1: Turbo-Generators
ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 6, pp. 224—227, 4 Figs., 2 Tables, 5 Equations, 7 Refs.
Starting from the state of developing complex antidamage automatics the asynchronous operation of turbo-generators is studied. As quasi-stationary asynchronous operation mode only an operation without excitation may be allowed. To improving the symmetry relations within the rotor and limiting overvoltages within the excitation winding it has to be short-circuited by using an additional resistance. To limiting the stator current within reliable values a power reduction by more than 40 procents of the rated power is necessary.

Oesingmann, D.; Morgenfrüh, B.
Influence of the Brush Quality on the Performance of D. C. Machines Supplied by Batteries
ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 6, pp. 228 and 229, 5 Figs., 2 Refs.
Starting from the ideal behaviour of the speed-torque-characteristic curve of d. c. shunt-woung machines it is illustrated, that for machines with low terminal voltages determined brush qualities effect a worth-while speed jump during transfer from motor operation to generator one. In some application cases this results in such effects, that a machine with such brush qualities is not adapted and not useable by energetical causes, but by functional ones.

Veselka, F.
„Short-Circuit of the Armature Circuit" and New Comparison Criteria in Studying the Commutating Behaviour
ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 6, pp. 230—232, 5 Figs., 5 Refs.
In this paper the transverse axis problem of a d.c. machine is considered. The influence of parameters is studied, which are adapted to evaluating experimentally transient processes. Furthermore, the influence of the composition of the magnetic circuit on the transient function of the magnetic flux is studied on base of the method „short-circuit of the armature circuit". Important measuring quantity is the change of the magnetic flux in winding probes, which are arranged below the commutating pole. For these considerations new comparison criteria are introduced.

Kalinchik, W. P.; Backmann, Chr.
To Questions of the Operative Prognosis of the Demand for Electric Energy of Industrial Objects
ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 6, pp. 232—234, 4 Figs., 2 Tables, 6 Equations, 4 Refs.
A simple, adaptive, combined prognosis model (AKM) on base of basic models is represented. The advantages of this AKM to the short-time prognosis of the demand for electric energy of different dynamics are indicated.

Dokumentation

Birke, K.; Walther, H.; Roschitzki, W.
CAD/CAM-Systeme für elektrische Maschinen und Antriebe
ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 6, S. 205–207, 2 Bilder, 5 Lit.
Der Einsatz von CAD/CAM-Lösungen bei der Produktion elektrischer Maschinen führt infolge ihres Einsatzes in Antriebssystemen zu einer direkten Verflechtung mit dem Produktionsprozeß. Wirtschaftliche Vorteile lassen sich bei konsequenter Integration des gesamten Reproduktionsprozesses eines Betriebes erzielen und führen zu CIM-Lösungen, speziell auf die jeweilige Produktionsstruktur zugeschnitten.

Timmel, H.; Jugel, U.
Mikrorechnergesteuerter, linearer Positionierantrieb mit Elementarschrittweiten unter 10 µm
ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 6, S. 208–213, 9 Bilder, 1 Tafel, 36 Gln., 9 Lit.
Es wird der Prototyp eines mikrorechnergesteuerten, linearen Positionierantriebs mit Elementarschrittweiten unter 10 µm vorgestellt. Aufbau, Wirkungsweise und Betriebsverhalten des untersuchten reluktanten Linearmotors werden im Überblick dargestellt. Durch das Zusammenwirken von 8-bit-Mikrosteuerrechner, Transistorpulssteller und Linearmotor wird ein Positionierantrieb mit Elementarschrittweiten unter 10 µm realisiert.

Beckert, U.
Theorie des dynamischen Verhaltens von Drehstromasynchronmotoren mit Stromverdrängungsläufer
ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 6, S. 213–216, 4 Bilder, 34 Gln., 3 Lit.
Es wird das mathematische Modell eines Asynchronmotors mit einer Mehrfachkäfigwicklung im Läufer entwickelt, mit dem die Stromverdrängungserscheinungen auch im dynamischen Betrieb berechnet werden können. Die Einführung von Raumzeigern ergibt eine mathematisch übersichtliche Darstellung.

Porzel, R.; Linsel, K.-H.
Isolationsprüfgerät für Hochspannungswicklungen elektrischer Maschinen
ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 6, S. 217–219, 7 Bilder, 5 Gln., 7 Lit.
Es wird ein Gerät zur Prüfung der Isolierung von Hochspannungsspulen elektrischer Maschinen beschrieben.
Eine hohe Empfindlichkeit wird durch die Verwendung des Dämpfungsfaktors als Meßwert erreicht. An Hand des Blockschaltbildes werden die Hauptbaugruppen Leistungsteil, Informationsteil und Steuerteil beschrieben. Experimentell ermittelte Zusammenhänge zwischen Meßwert und Fehlerparameter bestätigen die hohe Empfindlichkeit des Prüfverfahrens und die Zuverlässigkeit der Einrichtung.

König, H.
Ermittlung der Parameter von Drehstrom-Asynchronmaschinen vorwiegend aus den Typenschildangaben
ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 6, S. 220, 18 Gln.
Für die Ermittlung der Kennwerte des dynamischen Betriebes von Asynchronmaschinen wird ein aufwandsarmes Verfahren abgeleitet. Ausgehend von der Beschreibung der Maschine im rotoflußorientierten Koordinatensystem werden die Bestimmungsgleichungen für die im Nennpunkt gültigen Parameter aufgestellt, die nur auf den Daten des aufwandsarmen Leerlaufversuches und den Typenschildangaben beruhen. Ein Beispiel verdeutlicht die Handhabbarkeit des Verfahrens.

Diedrichs, V.
Zur Identifikation der Modellparameter elektrischer Maschinen mit stochastischer Optimierung
Teil 2: Globalitätswahrscheinlichkeit von mit Zufallssuchverfahren gefundenen Extrema
ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 6, S. 221–224, 4 Bilder, 20 Gln., 18 Lit.
Die Globalitätsbewertung gefundener Extrema stellt ein offen erscheinendes Problem dar. Es wird mit dem Begriff „Globalitätswahrscheinlichkeit" diskutiert. Konsequenzen für die Gestaltung der stochastischen Extremasuche werden abgeleitet.

Krause, M.
Beanspruchungen von Synchronmaschinen im Asynchronbetrieb
Teil 1: Turbogeneratoren
ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 6, S. 224–227, 4 Bilder, 2 Tafeln, 5 Gln., 7 Lit.
Ausgehend vom Stand der Entwicklung komplexer Antihavarieautomatiken wird der Asynchronbetrieb von Turbogeneratoren untersucht. Als quasistationäres asynchrones Betriebsregime kann nur ein erregungsloser Betrieb zugelassen werden. Zur Verbesserung der Symmetrieverhältnisse im Läufer und zur Begrenzung von Überspannungen in der Erregerwicklung ist sie über einen Zusatzwiderstand kurzzuschließen. Um den Ständerstrom in zulässigen Grenzen zu halten, ist eine Leistungssenkung um mindestens 40 % der Nennleistung notwendig.

Oesingmann, D.; Morgenfrüh, B.
Einfluß der Bürstenqualität auf das Betriebsverhalten von batteriegespeisten Gleichstrommaschinen
ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 6, S. 228 u. 229, 5 Bilder, 2 Lit.
Ausgehend vom idealen Verlauf der Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie von Gleichstrom-Nebenschlußmaschinen wird dargestellt, daß für Maschinen mit kleinen Klemmenspannungen bestimmte Bürstenqualitäten einen nennenswerten Drehzahlsprung beim Übergang vom Motor- zum Generatorbetrieb bewirken. In einigen Anwendungsfällen führt das dazu, daß eine Maschine mit solchen Bürstenqualitäten nicht aus energetischen Gründen, sondern aus funktionellen Gründen ungeeignet und nicht verwendbar ist.

Veselka, F.
„Kurzschluß des Ankerkreises" und neue Vergleichskriterien bei der Untersuchung des Kommutierungsverhaltens
ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 6, S. 230–232, 5 Bilder, 5 Lit.
Es wird die Querachsenproblematik einer Gleichstrommaschine betrachtet. Es wird der Einfluß von Parametern untersucht, die zur experimentellen Beurteilung von Übergangsprozessen geeignet sind. Weiter wird der Einfluß der Zusammensetzung des magnetischen Kreises auf die Übergangsfunktion des magnetischen Flusses auf Grundlage der Methode „Kurzschluß des Ankerkreises" untersucht. Wesentliche Meßgröße ist die Änderung des magnetischen Flusses in Wicklungssonden, die im Luftspalt unter dem Wendepol angeordnet sind. Für diese Betrachtungen wurden neue Vergleichskriterien eingeführt.

Kalinchik, W. P.; Backmann, Chr.
Zu Fragen der operativen Prognose der Elektroenergieabnahme von Industrieobjekten
ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 6, S. 232–234, 4 Bilder, 2 Tafeln, 6 Gln., 4 Lit.
Es wird ein einfaches, adaptives, kombiniertes Prognosemodell (AKM) auf der Grundlage von Basismodellen vorgestellt. Die Vorteile dieses AKM für die Kurzzeitprognose der Elektroenergieabnahme unterschiedlicher Dynamik werden nachgewiesen.

ELEKTRIE

Herausgeber	Kammer der Technik, Fachverband Elektrotechnik
Verlag	VEB Verlag Technik Oranienburger Str. 13/14, Berlin, DDR, 1020 Telegrammadresse: Technikverlag Berlin Telefon: 28700; Telex: 0112228 techn. dd
Verlagsdirektor	Dipl.-Ing. *Klaus Hieronimus*
Redaktion	Dr.-Ing. *Klaus Heide*, Verantwortlicher Redakteur (Telefon: 2870345) Ing. *Günther Barth*, Redakteur (Telefon: 2870343)
Lizenz-Nr.	1100 des Presseamtes beim Vorsitzenden des Ministerrates der Deutschen Demokratischen Republik
Gesamtherstellung	III/18/328 Messedruck Leipzig, BT Borsdorf Borsdorf, 7122
Gestalter	*Eckhardt Natorp* (Telefon: 2870287)
Anzeigenannahme	Für Bevölkerungsanzeigen alle Anzeigenannahmestellen in der DDR, für Wirtschaftsanzeigen der VEB Verlag Technik, Oranienburger Str. 13/14, Berlin, 1020, PSF 201 Anzeigenpreisliste Nr. 7 Auslandsanzeigen: Interwerbung GmbH, Hermann-Duncker-Str. 89, Berlin, DDR, 1157
Erfüllungsort und Gerichtsstand	Berlin-Mitte. Der Verlag behält sich alle Rechte an den von ihm veröffentlichten Aufsätzen und Abbildungen, auch das der Übersetzung in fremde Sprachen, vor. Auszüge, Referate und Besprechungen sind nur mit voller Quellenangabe zulässig.
AN (EDV)	6730
Erscheinungsweise	monatlich 1 Heft
Heftpreis	2,50 M, Abonnementpreis vierteljährlich 7,50 M. Auslandspreise sind den Zeitschriftenkatalogen des Außenhandelsbetriebes BUCHEXPORT zu entnehmen.
Bezugsmöglichkeiten DDR	sämtliche Postämter
SVR Albanien	Direktorije Quendrore e Perhapjes dhe Propaganditit te Librit Rruga Konference e Pezes, Tirana
VR Bulgarien	Direkzia R.E.P., 11a, Rue Paris, Sofia
VR China	China National Publications Import and Export Corporation, West Europe Department, P. O. Box 88 Beijing
ČSSR	PNS, – Ústřédni Expedicia a Dovoz Tisku Praha, Slezská 11, 12000 Praha 2 PNS Ústredna Expedicia a Dovoz Tlače Praha, Posta 022, 88547 Bratislava
SFR Jugoslawien	Jugoslovenska Knijiga, Terazije 27, Beograd; Izdavačko Knijižarsko Produzéće MLADOST, Ilica 30, Zagreb
Koreanische DVR	CHULPANMUL Korea Publications Export & Import Corporation, Pyongyang
Republik Kuba	Empresa de Comercio, Exterior de Publicationes, O'Reilly No. 407, Ciudad Habana
VR Polen	C.K.P.i.W. Ruch, Towarowa 28, 00-958 Warszawa
SR Rumänien	D. E. P. Bucaresti Piata Scinteii, Bucaresti
UdSSR	Städtische Abteilungen von Sojuzpečat' oder Postämter und Postkontore
Ungarische VR	P. K. H. I., Külföldi Elöfizetési Osztály, P. O. Box 16, 1426 Budapest
SR Vietnam	XUNHASABA 32, Hai Ba Trung, Hà Nôi
BRD und Berlin (West)	ESKABE Kommissions-Grossobuchhandlung, Postfach 36, 8222 Ruhpolding/Obb.; Helios Literatur-Vertriebs-GmbH, Eichborndamm 141–167, Berlin (West) 52; Kunst und Wissen Erich Bieber OHG, Postfach 46, 7000 Stuttgart 1; Gebrüder Petermann, BUCH + ZEITUNG INTERNATIONAL, Kurfürstenstraße 111, Berlin (West) 30
Österreich	Helios Literatur-Vertriebs-GmbH & Co. KG, Industriestraße B 13, 2345 Brunn am Gebirge
Schweiz	Verlagsauslieferung Wissenschaft der Freihofer AG, Weinbergstr. 109, 8033 Zürich
Alle anderen Länder	örtlicher Fachbuchhandel; BUCHEXPORT Volkseigener Außenhandelsbetrieb der Deutschen Demokratischen Republik, Leipzig, DDR, 7010, Postfach 160; und Leipzig Book Service, Talstraße 29, Leipzig, DDR, 7010

Im Fachbuchhandel erhältlich

Erkenntnismethoden in den Technikwissenschaften

Eine methodologische Analyse und philosophische Diskussion der Erkenntnisprozesse in den Technikwissenschaften

Herausgegeben von Dr. sc. phil. Gerhard Banse und Prof. Dr. sc. phil. Helge Wendt
192 Seiten, 12 Bilder, 6 Tafeln, Broschur, DDR 24,— M, Ausland 28,— DM.
Bestellangaben: 553 562 3/Banse, Erkenntnismethoden

Zur Beschleunigung des wissenschaftlich-technischen Fortschritts und zum Erreichen des dazu notwendigen Erkenntniszuwachses und -vorlaufs muß vor allem die technische Forschungs- und Entwicklungsarbeit rationalisiert und intensiviert werden. Auf Rationalisierungslösungen, die sich in der „Serienproduktion" bewährt haben, kann dazu nicht ohne weiteres zurückgegriffen werden, weil die Einmaligkeit der technischen Forschungs- und Entwicklungsarbeit die Anwendung derartiger Lösungen ganz und gar verhindert oder weil mit ihrer Anwendung nur ein geringer Effektivitätszuwachs erreicht wird. Eine durchgreifende qualitative Veränderung ist also nur möglich, wenn unter Beachtung der Besonderheiten technischer Forschungs- und Entwicklungsarbeiten verallgemeinerte Methoden zum Erkenntnisgewinn dem Ingenieur oder technischen Forscher (als dem „Erkenntnisgewinner") bewußt und bekannt gemacht werden und von ihm nicht zufällig und intuitiv, sondern zielgerichtet und bewußt angewendet werden.
Mit der vorliegenden Broschüre soll ein Beitrag zur Lösung dieser anspruchsvollen Aufgabe geleistet werden. Ein Kollektiv aus prädestinierten Gesellschafts- und Technikwissenschaftlern hat erstmalig in relativ geschlossener Form und in einer dem Ingenieur verständlichen Sprache eine „methodologische Analyse und philosophische Diskussion der Erkenntnisprozesse in den Technikwissenschaften" (Untertitel) vorgelegt. Darin wird — ausgehend von erkenntnistheoretischen Grundpositionen und methodischen Grundprinzipien — ein Überblick über die Erkenntnismethoden in den Technikwissenschaften (Heuristik, Mathematische Modellierung, Experimentelle Methode, Informationsgewinnung und -verarbeitung, Praxiserfahrungen, Erkenntnisgewinn aus der Technikgeschichte) gegeben, ihre Möglichkeiten und Grenzen gezeigt. Es wird deutlich, daß es nicht darum geht, die Erkenntnismethoden um ihrer selbst willen zu propagieren, sondern daß ihr bewußter Einsatz im Zusammenwirken mit dem Wissen, den Kenntnissen, Erfahrungen, Fähigkeiten und Fertigkeiten des schöpferisch tätigen Ingenieurs oder Technikwissenschaftlers eine unerschöpfliche Quelle zur Rationalisierung und Effektivitätssteigerung seiner Arbeit ist.

HAUPTABSCHNITTE

Erkenntnistheoretische Grundfragen der Technikwissenschaften
Problemtypen in den Technikwissenschaften
Struktur der Beziehungen zwischen naturwissenschaftlichen Erkenntnissen und technischen Lösungen
Erkenntnismethoden in den Technikwissenschaften
Das Gefüge der Erkenntnismethoden in den Technikwissenschaften.

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

VT

ISSN 0013–5399
ELEKTRIE · Berlin 42 (1988) 6 · S. 201–240

0130 6 177 027 465
KOMB KERAM WERKE
8612 7001 0136 PF 1

Im Fachbuchhandel erhältlich

Elektrische Maschinen

Betriebsverhalten rotierender elektrischer Maschinen

Von Prof. Dr.-Ing. habil. Germar Müller
548 Seiten, 325 Bilder, 24 Tafeln, Kunstleder, DDR 41,— M, Ausland 58,— DM.
Bestellangaben: 553 322 2/Müller, Betriebsverhalten

Das Buch ist Bestandteil des Hochschullehrwerks „Elektrische Maschinen", herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. habil. Germar Müller. Es löst den Band „Theorie rotierender elektrischer Maschinen" ab. Grundlage der Neufassung war die generelle Überarbeitung des Lehrwerks nach inhaltlichen und methodischen Gesichtspunkten. Das Gesamtwerk besteht nunmehr aus den Bänden

Müller: Grundlagen, Aufbau und Wirkungsweise (7., bearbeitete Auflage in Vorbereitung für September)

Vogt: Berechnung rotierender elektrischer Maschinen (4., bearbeitete Auflage erscheint voraussichtlich im Juli)

Müller: Betriebsverhalten rotierender elektrischer Maschinen

In den ersten Abschnitten des Bandes „Betriebsverhalten" werden, ausgehend von den Gleichungen des elektromagnetischen Feldes, die allgemeinen Prinzipien zur analytischen Behandlung rotierender elektrischer Maschinen entwickelt. Auf ihrer Grundlage entstehen dann für einzelne Maschinengruppen allgemeine Gleichungssysteme, die zur Behandlung stationärer und nichtstationärer Betriebszustände herangezogen werden. Dabei wird besonders auch auf das Zusammenwirken der elektrischen Maschinen mit leistungselektronischen Stellgliedern eingegangen. Von den Arten der rotierenden elektrischen Maschinen her beschränken sich eingehende Untersuchungen auf die Asynchronmaschine, die Synchronmaschine und die Gleichstrommaschine. Gegenüber der Behandlung im Band „Grundlagen" wird dabei stets von allgemeinen analytischen Beschreibungen ausgegangen, die auch für anomale stationäre und nichtstationäre Betriebszustände anwendbar sind. Außerdem wurde die Palette besonderer Ausführungsformen der genannten Maschinenarten erweitert.

Die gewählte Art der Darstellung des Stoffs beruht auf Erfahrungen langjähriger Lehrtätigkeit des Autors. Darüber hinaus berücksichtigen Inhalt und Aufbau des Buches aktuelle Probleme der Weiterentwicklung der Erzeugnisse des Elektromaschinenbaus, vor allem unter dem Aspekt der Automatisierung in der Antriebstechnik. Besonders hervorzuheben sind

- die moderne Fassung der Prinzipien zur analytischen Behandlung elektrischer Maschinen
- die Behandlung des Betriebs von Asynchron- und Synchronmaschinen bei Umrichterspeisung
- die Behandlung der Oberwellenerscheinungen bei Asynchronmaschinen
- die Behandlung der feldorientierten Regelung von Asynchron- und Synchronmaschinen
- die Behandlung der Synchronmaschine als Stromrichtermotor und als Elektronikmotor.

Der Stoff ist klar und übersichtlich dargelegt, die Anpassung an die beiden anderen Bände des Lehrwerks ist voll gewährleistet.
Das Buch ist neben seiner Anwendung in der Lehre auch hervorragend geeignet zur Vertiefung der Kenntnisse für alle in Forschung, Entwicklung, Herstellung und Anwendung tätigen Ingenieure auf dem Gebiet der rotierenden elektrischen Maschinen.

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN